

# TMMOB ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI

mt:

**Elektrik - Elektronik  
Bilgisayar Mühendisliği  
8. Ulusal Kongresi  
6 -12 Eylül 1999**

 **Gaziantep**



TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası  
Gaziantep Şubesi

Gaziantep Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

25. YIL

TÜBİTAK

YayırtayaRtar:

Gazkmtep Üotvertttesi  
Möfiendlstlk Fafkütteei  
Elektrik - Etékken \* ühendtettöi Bölümü  
27310/GAZIANTEP

Elektrik Mühendisleri Odası  
Gaziantep Şubesi

TÜBİTAK

**ISBN 975 - 737S - ^ 9 (TK) - âf - 7 (1C)**

Yaym Hakkı © | ^ & s û â â r t t e p Ü n i v e r s i t e s i , E M Ö , T Ü B İ T A K

Her hakte mahfuzdur. Bu yayının hiç bir kısmı yayımcılardan Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hektrik - Elektronik Mühendisliöi Bölümü, Bektrik Mühendisleri Odası Gaziantep Şubesi ve TÜBİTAK'ın yazılı izni alınmadan çoöaltriamaz ve hiç bir biçimde bir erişim sisteminde saklanamaz.

1. Basım : Eylül 1999  
Uöur Ofset tarafından basılmıştır.  
Telefax : (0 342) 220 34 02  
GAZIANTEP

## ÖNSÖZ

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü ve TÜBİTAK'ın işbirliği ile düzenlenen Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresini bu yıl, ilk defa Güneydoğu Anadolu Bölgesinde; Gaziantep'te yapmaktan gurur ve mutluluk duyuyoruz. Kongre; 6-10 Eylül 1999 tarihleri arasında Gaziantep Büyükşehir Belediyesinin Belediye Sarayı'nda tarafımıza tahsis ettiği salonlarda 4 eş zamanlı oturum halinde gerçekleştirilecektir.

Kongreye gösterilen yoğun ilginin sonucu çok sayıda bildiri gönderilmesine karşın teknik programda yeterli sayıda zaman aralığı bulunmaması nedeniyle, hakemlerden gelen değerlendirmelerin ışığında, programa toplam 212 bildiri alınabilmiştir. Her ne kadar ön duyurumuzda kongrede sunumları kabul edilmiş ancak katılım ücreti ödenmemiş bildirimlerin Kongre Kitabı'nda yer almayacağını belirtmiş idiysek de Yürütme Kurulumuz bilimsel hedeflere öncelik tanıyarak, kongrede tartışılmayacak olsalar bile, kabul edilen tüm bildirimlerin Kongre Kitabı'nda yer almasını uygun bulmuştur. Kabul edilen bu 212 bildiri 2 cilt halinde sizlere sunulmaktadır. Kongrede tartışılacak, ilginizi çekeceğine inandığımız, bu bildirimleri doyurucu nitelikte bulacağınıza eminiz.

Kongre sırasında geniş bir katılımcı kitlesinin ilgisini çekeceğini umduğumuz iki konuda panel düzenlenmiş ve kongre içersinde çağrılı bildirimlere de yer verilmiştir. Ayrıca kongre salonlarının hemen yakınında, 2000m<sup>2</sup> kapalı alanda düzenlenen ve sektördeki firmaların katıldığı "Elektrotil'99" Fuarının da kongremize ayrı bir renk katacağı inancını taşıyoruz.

Kongremizin sponsor kuruluşlarına, Flektrotil'99 Fuarı'na katılarak kongremizi destekleyen özel ve kamu kuruluşlarının yetkililerine, panelistlere, kongreye çağrılı bildiri ile katılan değerli bilim adamlarımıza destek ve katkılarından dolayı teşekkür etmeyi borç biliyoruz

Kongreler, yapılan bilimsel çalışmaların ve üretilen teknolojik yeniliklerin daha geniş bilimsel kitlelerin hizmetine sunulduğu, tartışıldığı ve karşılıklı bilgi alışverişi yapıldığı ortamlardır. Bu yönüyle anılarınızda özel bir yer almasını dilediğimiz 8. Ulusal Kongre'nin, siz katılımcılar için başarılı ve doyurucu olmasını; ayrıca ülkemizin bilimsel ve teknolojik ilerlemesine yön vererek ve ivme kazandırarak amacına ulaşmasını diliyor, Yürütme Kumlumuz adına hepimize saygılarımızı sunuyorum.

Tuncay Ege  
Yürütme Kurulu Başkanı

# Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği

## 8.Uhısal Kongresi

### (6-12 Eylül 1999)

#### Kongre Yürütme Kurulu

Tuncay EGE  
Muhammet KOKSAL  
M. Sadettin ÖZYAZICI  
Hamit SERBEST  
Eyüp AKPINAR  
Cemil ARIKAN  
ArifNACAROĞLU  
Gülay TOHUMOĞLU  
Savaş UÇKUN  
M. Hacim KAMOY  
Serdar BOZKURT  
H. Ali YİĞİT  
M. Sıtkı ÇİĞDEM  
Erol KARABAY  
Doğan EYİKOÇAK  
Mustafa KURT  
Alaadin COŞKUN

Gaziantep Üniversitesi EE Müh. Böl  
İnönü Üniversitesi EE Müh. Böl.  
Gaziantep Üniversitesi EE Müh. Böl.  
Çukurova Üniversitesi EE Müh. Böl.  
Dokuz Eylül Üniversitesi EE Müh. Böl.  
TÜBİTAK  
Gaziantep Üniversitesi EE Müh. Böl.  
Gaziantep Üniversitesi EE Müh. Böl.  
Gaziantep Üniversitesi EE Müh. Böl.  
ASELSAN A.Ş. Genel Müdürü  
SİMKO A.Ş.  
E.M.O. Yönetim Kurulu Başkan  
E.M.O. Yönetim Kurulu Yazman Üyesi  
E.M.O. Gaziantep Şb. Yön. Kur. Bşk.  
E.M.O. Gaziantep Şb. Yön. Kurulu Bşk. Yrd.  
E.M.O. Gaziantep Şb. Yön. Kurulu Yazman Üyesi  
E.M.O. Gaziantep Şb. Yön. Kurulu Üyesi

#### Konular

- \* Bilgisayar Ağları ve Donanımı
- \* Devreler ve Sistemler
- \* Elektrik Makinaları
- \* Elektromagnetik Alanlar ve Mikrodalga tekniği
- \* Elektronik
- \* Enerji Üretim, İletim ve Dağıtım
- \* Güç Eletronıği
- \* Haberleşme Tekniği
- \* Mekatronik ve Robotbilim

- \* Optoelektronik
- \* Otomatik Kontrol
- \* Örüntü Tanıma, Sinyal İşleme, Görüntü Kodlama
- \* Tıp Elektronıği
- \* Tapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık
- \* Yüksek Gelirim Tekniği
- \* Ölçme Tekniği
- \* Mühendislik Eğitimi

## Rüzgar Enerjisinin İncelenmesi ve Türkiye'deki Son Durumu

C. Bahar, A. Demirören

İ.T.O Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Müh. Bölümü

e-mail:aysen@elk.itu.edu.tr

**Abstract:** The current paper describes the fundamentals of wind energy and Turkey's current look to the subject. The introduction part defines the technical items in the concept of v/ind energy technology and covers up a general outlook to inform relevant participants. Turkey's vision for wind energy has been examined with economical states, strategies and future perspectives. The paper finishes with a conclusion part with suggestions involved.

## GİRİŞ

Dünyada enerji konusu yüzyıllara dayanan bir aşama geçirmiştir. Milattan önceki devirlerde bile rüzgar enerjisi kullanılırken, buhar gücünün keşfi bunun bir kenara itilmesine ve hatta petrolün bulunuşu yenilenebilir kaynakların neredeyse unutulmasına neden olmuştur. 1970'lerde petrolde yaşanan krizin yanısıra varolan yeraltı kaynaklarının sınırlılığı ve ekolojik dengesizlikte etken olması, beraberinde yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım ve araştırma yapmayı gündeme getirmiştir.

Son 15-20 yıl içerisinde yeniden yaratılan rüzgar enerjisi endüstrisi ile geçmişte elektrik üretiminde kullanılan rüzgar türbinleri ya da diğer bir deyişle rüzgar generatörleri (aerogeneratörler), yeni bir teknoloji ürünü WECS (Rüzgar Enerjisi Çevrim Sistemi) olarak geliştirilmişlerdir. WECS'ler otoprodüktör üniteler olarak değil, enterkonnekte sistemi beslemek için kurulmaktadır. Güçleri 100 kW ila 2000 kW arasında olup, en çok kullanılan makineler 450-750 kW güçlüdür. Elektrik ağı bağlantılı rüzgar santralleri tek bir türbinden oluşabileceği gibi, rüzgar çiftliği olarak tanımlanan yan yana çok sayıda rüzgar türbininden oluşabilirler.

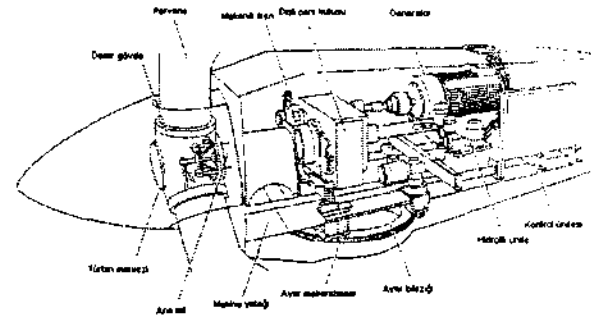
Bir rüzgar türbini güç üretimini, kanatlar üzerine gelen rüzgarın oluşturduğu bir moment sayesinde gerçekleştirir. Kanatlar sayesinde bir vites kutusu üzerinden rotora ulaştırılacak güç, havanın özgül ağırlığına, pervanenin süpürme alanına ve de rüzgarın hızına bağlıdır. Ancak bu terimler içerisinde tabiki en önemlisi çıkış gücünü kübü oranında etkileyen rüzgar hızıdır.

## RÜZGAR TÜRBİNİNİ OLUŞTURAN DÜZENEKLER

Bir rüzgar türbinini oluşturan parçalar, sistemin akış yönü açısından şu şekilde sıralanabilir:

Güç üretiminin, gelen rüzgarın pervaneler üzerinde oluşturduğu bir moment sayesinde başladığını daha önce belirtmiştik. Bu moment, pervaneyi dişli çark düzeneğine bağlayan bir mil üzerine aktarılır. Bu mil düşük hızla dönen bir mildir ve 600 kV'lık tipik bir makinada dakikada 19 ila 30 arasında bir devir gerçekleştirir. Mil içerisinde aynı zamanda hidrolik ünitenin frenleme mekanizması için gerekli iletim borularında mevcuttur. Aktarılan moment 1:50 çevirme oranına sahip bir dişli çark kutusu üzerinden 1500 d/d hızla dönen başka bir mile iletilir. Bu sayede tahrik edilecek olan generatörün anma hızına ulaşılmış olur. Bu mil direkt olarak generatörü tahrik eder ve üzerinde hidrolik frenleme ünitesinin çalışmaması halinde acil frenleme sağlayabilmek amacıyla konulmuş bir mekanik fren sistemini barındırır. Generatörün seçimi senkron veya asenkron olarak gerçekleştirilir. Çok kutuplu bir elektrik makinesi tercih edilmesi durumunda dişli çark kutusuna gerek kalmamaktadır.

Aşağıda Vestas firmasına ait V27/250 kV'lık bir türbinin üç boyutlu şeması sunulmuştur.



Türbin içerisinde birde ayar mekanizması mevcuttur. Ayar mekanizması rüzgarı tam karşıdan alabilmek için türbinin yönünü birkaç derece kadar döndürebilir. Bu mekanizmaya kumanda bir güç elektroniği düzeneğiyle sağlanır. Elektronik kumanda sistemi türbin üzerine yerleştirilmiş anemometre ve ilişkin cihazlarla bağlanmıştır; kurularak ayar mekanizmasını yönlendirebilir. Aynı zamanda bu elektronik düzen sayesinde sistemin devamlı monitörlemesi yapılarak; dişli çark kutusu ve generatördeki aşırı ısınma durumlarında devreye açmada yapılabilir. Bu tarz arıza durumlarında servis operatörünü telefon veya da modem vasıtasıyla uyarabilmesi sayesinde çabuk bir müdahale gerçekleştirilerek işletme saatindeki kaybı küçük tutmak

hedeflenmiştir. Sistemde birde havalandırma ünitesi mevcuttur. Bu ünitenin görevi hem generatör soğutmasını sağlamak hemde dışlı çark kutusunun yağ ihtiyacını karşılamak ve ayarlamaktır.

Rüzgar türbinleri, genel olarak dikey milli ve yatay milli olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Günümüzde şu an geçerliliği olan tip yatay milli rüzgar türbinidir. HAWT (Horizontal axis wind turbine) olarak kısaltılmış olan bu türbinler de rüzgarı önden (upwind) veya arkadan (downwind) alacak şekilde iki tip olarak üretilirler. Dikey milli rüzgar türbinleri ise rüzgarın esiş yönünden bağımsız çalışabilen avantajlarına karşın henüz yüksek güçlerde üretilememekte, orta güçlerde ise yatay milli rüzgar türbinleri daha optimum bir işletme sağlamaktadır.

## **RÜZGAR ENERJİSİNİN TEKNİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

Rüzgar enerjisini kullanıma açabilmek amacıyla öncelikli olarak bir yer tespiti şarttır. Bir alanda rüzgar enerjisi tespiti yapmak için o bölgede çeşitli ölçümlerin mümkün olduğunca uzun vadeli dönemlere yayılarak yapılması gerekir. Rüzgar çok değişken karakterler gösterdiği için uzun vadeli ölçümler daha güvenilir verilere işaret eder. Bu ölçümlerin başında rüzgar hızının tespiti gelir ki bu ölçüm yıldırım, buzlanma ve benzeri etkilere oldukça dayanıklı hale getirilmiş, verileri chiplerde muhafaza edebilen elektronik anemometrelerle gerçekleştirilmektedir. Anemometreler ölçüm yapılacak alanda tahmini türbin yüksekliklerine (10-40m) yerleştirilir ve genellikle 10 dakikalık ortalamalar şeklinde rüzgar hızını kaydederler.

İkinci tip bir ölçüm ise rüzgarın esiş yönünü tayin etmek istemiyle rüzgar gülleri sayesinde yapılır. Rüzgar gülleri, herbiri 30°'ye karşılık gelen 12 bölgeye (Avrupa Rüzgar Atlası standardı) ayrılmıştır. Her bölgede üç adet gösterge mevcuttur. Birinci gösterge, rüzgarın zamanın yüzde kaçında hangi yönden estiğini gösterirken ikinci gösterge esiş yönlerinin rüzgar hızı ile çarpımı ifadesiyle bir gösteriş temsil eder. Üçüncü gösterge ise aynı bilgiyi rüzgarın kübü ile çarpımı şeklinde sunmaktadır. Rüzgar güllü sayesinde görelî rüzgar esiş yönlerinin tespiti gerçekleştirilmiş olur.

Bu ölçümler gerçekleştirildikten sonra rüzgarın türbin üzerine geliş yönündeki arazi incelenmeye başlanır. Bu incelemeler için bazı kriterler ortaya konulmuştur. Bu kriterlerden biri pürüzlülük sınıfıdır. Pürüzlülük sınıfı G ile 4 değerleri arasında konulabilir. Değeri ideal olarak belirlenmiş deniz yüzeyinin sınıf değeri sıfırdır. Çok binalı ve ağaçlı tip yer yüzeyleri en yüksek sınıflar olarak adlandırılır ve değerleri 3 veya 4 dür. Bu aşamada 1 km'ye kadar olan engellerin 1 km'den ötesi gereksizdir<sup>1</sup> rüzgar hızına olan etkileri hesaplanabilir. Bu hesaplamalarda engellerin rüzgar kesiş oranları, geçirgenlik adı verilen bir terimle tanımlanabilir. Bir

binanın geçirgenliği %0 iken bir ağaç topluluğunun değeri dallar arasındaki boşluklara göre %30,50 veya 70 değerlerini alabilir. Rüzgar gücünüzü etkileyecek yüksek pürüzlülük sınıflarının varolması halinde bu engellerin - bina veya ağaç topluluğu- birim birim incelenmesi gerekir. Bu engellerin rüzgardan elde edeceğiniz güce olan etkisi, rüzgar gölgelemesi olarak adlandırılır. Birimler halinde etkilerin incelenmesi, engellerin geçirgenliğine bağlı olarak hesaplanabilir.

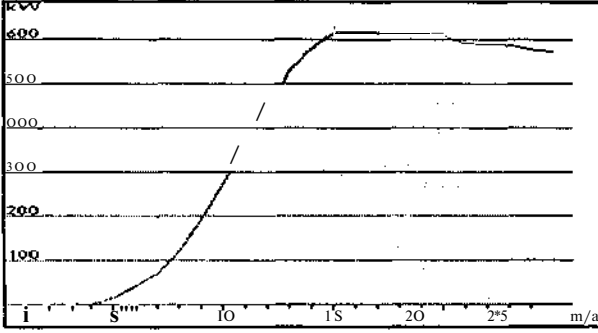
Rüzgar çiftlikleri kurarken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de türbinlerin yerleştirilmesidir. Türbinin pervanesinden geçen rüzgar arka tarafta enerjisi belli bir oranda tüketilmiş bir potansiyel bırakır. Bir başka sorun ise türbülans etkisi olarak kendini gösterir. Türbülans rüzgardaki enerjiyi verimli bir şekilde kullanma olasılığını azaltan bir etkidir. Bu olgulardan dolayı verim açısından konuşlandırma oldukça dikkat gerektirir. Park etkisi olarak da adlandırılan yukardaki olumsuzluklar belli kriterler ile düzenlenmiştir. Türbinlerin yan yana dizilmesi durumunda türbin aralarının 4 pervane çapı kadar iki veya daha fazla sıra halinde dizilmesi halinde ise çarpaz düzende oturtulmaları gerekmektedir. Bu dizilimde ise mesafe 7 pervane çapı olarak belirlenmiştir.

Rüzgarın doğada ivme kazandığı belli oluşumlardan da daha etkin kullanım için faydalanabilir. Hafif bir tepe, yüksekliği kadar bir alandaki rüzgar vektörlerini bileşke bir vektör halinde zirvesinden geçmesini sağlayabilir. Benzeri avantaj iki yükselti arasında kalan dar bölgelerde de kendini gösterir. Buna tünel etkisi denir. Türkiye'de bu şekilde çok etkili rüzgar tünelleri mevcuttur. Bu rüzgar tünelleri sayesinde türbinlerin ileride Türkiye'de yapılması da olası bir hal almıştır.

Türbinlerin şebeke bağlantısı direkt ve indirekt olarak gerçekleştirilebilir. Doğrudan şebeke bağlantısında generatör 3 fazlı şebekeye direkt olarak bağlanmış demektir. Dolaylı şebeke bağlantısında ise indüklenen akımın belli güç elektroniği düzenlerinden geçerek şebeke ile senkronizasyonu sağlanmaya çalışılır. Dolaylı yöntemin üstünlüğü türbinin farklı hızlarda çalıştırılabilmesidir. En büyük sakıncası ise maliyetidir. Asenkron bir makine bu ayarlamaları kendisi gerçekleştirebilmektedir. Senkron bir makine kullanıldığında ise, rotorun doğru akımla beslenmesi gerekir. Bu, alternatif şebekeden alınan akımın çeviriciler sayesinde doğru akıma çevrülmesiyle sağlanır. Bilindiği üzere senkron makina senkron hız harici bir hızda dönemez ancak asenkron makina, moment ile değişen hız seviyelerine sahiptir. Bu özelliği sayesinde, dışlı çark kutusunda daha az mekanik yıpranma oluşur. Doğrudan şebekeye bağlanmış rüzgar türbinlerinde asenkron makinenin seçilmesinin en önemli nedenlerinden biri de budur. Asenkron makinaya yol verebilmek için sistemde akü, güç elektroniği düzeneği ve düşük güçlü bir Diesel generatör bulunmalıdır.

Rüzgar türbinleri rüzgarı pervane yüzeyine paralel olarak değil de dik olarak alacak şekilde tasarlanırlar ve rüzgar alanına bu şekilde yerleştirirler. Bu uygulamadaki amaç esiş yönünü daha geniş olarak karşılayabilmek ve bu sayede türbini daha fazla çalışma zamanına ulaştırabilmektir. Rüzgar dik olarak karşılandığı için pervaneler arka tarafları eğimli olarak tasarlanmışlardır. Böylece pervanenin arka yüzeyine rüzgar ile birlikte daha büyük bir kaldırma kuvveti bindirilmiştir. Bu da rüzgarı paralel olarak karşılamaya oranla bir dezavantaj olarak görülen pervane dönüş hızını bir şekilde arttırmış olur.

Modern rüzgar türbinleri genel olarak 690 V'luk gerilim ile elektrik üretirler. Bu gerilim 10-30 kV seviyelerine yükseltilecek şekilde şebekeye verilebilir. Günümüzde en optimum, dolayısıyla en çok tercih edilen rüzgar türbinleri 500-650 kW gücündeki türbinlerdir. Bir örnek olarak, 600 kW 'lık bir türbinin devreye girme rüzgar hızı 5 m/s, anma rüzgar hızı 13-14 m/s ve de devreden çıkma rüzgar hızı 24-25 m/s 'dir. Devreye girme rüzgar hızı bazen sisteme düşük güçlü (25-75 kW) bir generatör ekleyerek 3-4 m/s düzeylerine indirilir. Aşağıda 600 kW'lık bir türbinin güç karakteristiği verilmiştir.



Alan kontrollü olarak dizayn edilen bazı rüzgar türbinlerinde elektronik bir sistem saniyede birkaç kere çıkış gücünü kontrol eder ve pervanenin arka yüzeyinde bulunan kanatları hareket ettirerek güç çıkışına göre alanı küçültür veya büyütür, bu şekilde güç üretimi kumanda edilmiş olur.

#### RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Rüzgar türbinlerindeki en önemli çevresel faktör, gürültü etkisidir ve iki nedene bağlıdır.

- Dişli çevirme kutusu ve generatörden çıkan mekanik sesler
- Türbin pervanelerinin yüksek hızlarda dönmesiyle ortaya çıkan aerodinamik sesler.

Yapılan gürültü hesaplarına göre türbinin çevresinde 50 m'lik bir yarıçap içerisinde 55 dB değerinde bir ses düzeyi mevcutken, 300 m'lik bir yarıçaptan sonra ses düzeyi 35 dB seviyelerine kadar inmektedir. Bu değerlere referans olması açısından; hergün ofislerimizde 60 dB, evlerimizde 50 dB'lik ortalama ses düzeyleriyle

karşı karşıya kaldığımızı söyleyebiliriz. Sonuç olarak türbin gürültüsü çevresel kirlilik açısından ileri düzeyde bir olumsuzluk içermemektedir.

Türbinlerin aynı zamanda kuşların göç yolları veya konaklama mekanlarıyla çakışacak noktalara da uzak konulmasına çalışılır. Bu sayede günümüzün modern rüzgar türbinleri çevreyle fevkalade uyum sağlayan enerji santralleri olarak önümüze çıkmış bulunmaktadır.

#### RÜZGAR ENERJİSİNİN TÜRKİYE VE DÜNYA'DAKİ DURUMU

Yenilenebilir kaynaklar içerisinde rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve jeotermal enerjinin önüne geçmiş görünmektedir. Bu enerji türünde başı çeken ülkeler arasında ABD, Almanya, Japonya ve Danimarka bulunmaktadır. 1990 yılında dünyada kurulu rüzgar gücü 2160 MW iken, bu değer 1997 sonunda 7500 MW'ı aşmıştır. Avrupa'nın kurulu rüzgar gücü ise 4400 MW civarındadır.

Türkiye, rüzgar enerjisi potansiyeli açısından oldukça verimli bir ülkedir. DMİ tarafından 1970-1980 arasında yapılan ölçümler sonucunda Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgar hızı 10 m yükseklikte 2.54 m/s ve güç birimi olarak da 24 W/m<sup>2</sup> olarak ortaya konmuştur. Rüzgarın meteorolojik ve topoğrafik özelliklere göre değişmesi nedeni ile Türkiye'nin rüzgar enerjisinden elektrik üretim kapasitesini tespit etmek oldukça güç görünmektedir. Ancak, bugüne kadar yapılan çalışmalar Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelinin teorik olarak 400 milyar kWh, teknik olarak ise 120 milyar kWh civarında olduğunu göstermektedir. Özel sektör tarafından yapılan başvuruların sayısı da Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde önemli bir göstergedir. Rüzgar enerjisi potansiyelinin en fazla olduğu ve rüzgar santrali kurulması açısından optimum şartları taşıyan bölgeler için yapılan başvurular dikkate alındığında, mevcut 600 MW civarındaki başvuru ile yılda yaklaşık 2,5 milyar kWh enerji üretilebileceği hesaplanmaktadır. Önümüzdeki 10 yıl içinde bu kapasitenin 3000-5000 MW'a, enerji üretiminin ise 9-15 milyar kWh'a çıkması beklenmektedir.

Enerji Bakanlığı'nın rüzgar enerjisi ile ilgili hedefi, 2005 yılına kadar Türkiye'nin kurulu gücünün %2'sinin rüzgar enerjisi ile karşılanmasını öngörmektedir (bu rakam Danimarka'da %20 civarındadır). Bu da 2005 yılı arz talep tahminleri dikkate alındığında 600-700 MW'lık kurulu güç kapasitesine karşılık gelmektedir. Bugüne kadar yapılan rüzgar ölçümleri sonucunda Türkiye'nin rüzgar potansiyeli açısından tespit edilen en uygun bölgeleri Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz bölgeleridir. İl bazında ise İzmir-Çeşme, Çanakkale, Manisa (Akhisar), Muğla (Bodrum, Datça), Hatay (Şenköy, Belen), Gaziantep (Nurdağ), Balıkesir (Bandırma, Erdek) rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından uygun yerler olarak görülmektedir.

Rüzgar enerjisi ile ilgili bilimsel, teknik ve uygulamalı araştırmaları takip etmek, sözkonusu enerji kaynağının yaygın olarak kullanılması için seminer, konferans, panel ve toplantılar gibi iletişim faaliyetlerinde bulunmak ve yayınlar yapmak amacıyla 10 Şubat 1992 tarih ve 92/2752 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi (AREB-TŞ) kurulmuştur. AREB-TŞ'nin 128 üyesi bulunmaktadır. Daha sonraki yıllarda aynı üyelerin katkılarıyla Rüzgar Enerjisi Santralleri Sanayii İş Adamları Derneği (RESSİAD) kurulmuştur.

Özel sektör tarafından rüzgar enerjisi yatırımlarına sıcak bir ilgi gözlenmektedir. Rüzgar enerjisinden elektrik üretimine yönelik yatırımlar, özel sektör tarafından Yap-İşlet-Devret modeli veya otoprodüktör statüde gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde şu anda otoprodüktör statüde 1.8 MW gücünde İzmir-Germiyan mevkiinde ve YİD modeli ile İzmir-Alaçatı'da 7.2 M W gücünde tesis edilmiş iki adet santral mevcuttur. YİD modeli ile kurulmak istenen rüzgar santrali başvuruları 29 adede, başvuruların toplam kurulu gücü de 700 MW'a ulaşmıştır.

Rüzgar enerjisi üretimine olan girişimlerin, hukuksal alt yapı ve arazi kullanımı ile ilgili yapılacak muhtemel düzenlemeler ile artacağı beklenmektedir. Öncelikle ülkemizin rüzgar atlası henüz oluşturulamamıştır. Bu konuda TÜBİTAK, DMI ve özel sektör hızlı bir çalışma içindedir.

İlk başvuru ile sözleşme imzalanması arasında geçen süre mevzuat tıkanıklıkları ve bürokratik engeller dolayısıyla 1,5 yıla kadar uzayabilmektedir. Oysa ki bir rüzgar tesisinin kurulması 3-4 ay gibi kısa bir süreyi kapsamaktadır. Rüzgar ölçümlerinin de asgari 1-2 yıl sürdüğü düşünülürse bir tesisin kurulması için gerekli süre karar aşamasından itibaren 3-4 yıl gibi çok uzun bir zaman dilimini işaret etmektedir.

Türkiye'de üretilen elektrik TEAŞ'a satılmaktadır. TEAŞ'ın uyguladığı fiyat politikasının da rüzgar enerjisinin gereklerine göre bazı düzenlemeler yapılarak, sektörün önünü açmalıdır. Ülkemizde rüzgar enerjisi santrallerinin gelişmesi Türkiye'nin hat kapasitesinin gelişmesi ile bir paralellik göstermektedir. Türkiye'nin rüzgarlı yöreleri daha çok dağlık alanlarda olduğu için enterkonnekte şebekeye uzaktır. Bu uzak noktalara yatırımcı tarafından hat döşenmesi yatırım maliyetinin artmasına neden olur.

Türkiye'nin rüzgar potansiyeline elverişli birçok yeri SİT alanı içine alınmış, fakat korunmaya muhtaç durumdadır. Rüzgar santrali kurulan yerler her türlü etkiden korunacağı için bu santrallerin kurulacağı alanların yatırıma açılması gerekir.

Denizüstü Rüzgar Çiftlikleri: Artık rüzgar türbinleri ve rüzgar çiftlikleri karasal alanlardan öte denizüstünde kurulabilmektedir. Denizüstü (off-shore) WECS'lerin önemi giderek artmaktadır. Türkiye 7000 km'lik kıyı şeridi ile bu açıdan da yüksek bir potansiyele sahiptir. 1981 yılında karada kurulan bir rüzgar türbininde birim kurulu güç maliyeti 4000 \$/kW iken, bugün 900 \$/kW'a kadar düşmüştür. Denize tesis edilen türbinlerin (off-shore) maliyetleri karada tesis edilmiş santrallara oranla 1,5 ila 2 kat daha fazladır. Bugün ise şebeke bağlantısı da dahil olmak üzere 1700 \$/kW'a deniz santrali kurulabilmektedir. Denizüstü santrallarda maliyet, demir temeller nedeniyle kabarmaktadır.

Denizüstü rüzgar türbinleri, pürüzlülük sınıfı sıfır olan yüzeylerde kuruldukları için kara santrallerine oranla boyları %25 daha kısa seçilebilir. Ayrıca denizüstü rüzgar türbinleri, daha az türbülansa maruz kaldıkları için ömürleri de daha uzundur.

### SONUÇ

Rüzgar enerjisi ile ilgili teknoloji çok hızlı bir şekilde gelişirken, mevcut ve yeni teknolojilerin yakından takibi ve ülkemize uygun teknolojilerin transferi amacıyla AR-GE faaliyetlerinin izlenmesi gerekliliği doğmuştur. Türkiye rüzgar enerjisiyle yeni tanışan bir ülke konumunda olduğuna göre, öncelikli önem taşıyan konu, bilgilendirmedir. Büyük potansiyeline rağmen Türkiye'de rüzgar enerjisinin önünü tıkayan bir çok sorun mevcuttur. Mevcut kadroların kararlı tutumları ile sorunların hızla giderilmesi sonucunda özel sektörün girişimleri de ivmelenecektir.

Sektörde yer edinmiş ülkelerdeki teknolojik bilgi birikimi konuyla ilgili kuruluşlara aktararak ve gerekli yasal düzenlemeler de en kısa zamanda yapılarak bu konudaki çalışmaların önü açılmalıdır. Türkiye'nin ileride bir enerji üssü olması, jeopolitik konumunun doğal bir sonucu olacaktır.

### Kaynakça

- [1] *fWind Energy Investment in Turkey, 3-4 April 1997, Ankara-Turkey. Organisation by Turkish Wind Energy Association TİVEA*
- [2] *Danish Wind Turbine Manufacturers Association homepage*
- [3] *Wind Energy Technology- John F. Walker, Nicholas Jenkins- UNESCO Energy Engineering Series-1997*
- [4] *European Wind Energy Association(EİVEA) homepage- Hind Energy Facts*
- [5] *Wind Energy- Der ek Taylor-Mc.Graw Hill series 1995*
- [6] *//. Ulutul Temiz Enerji Sempozyumu, 6-7 Ocak 1997 İTİ:*
- [7] *Türkiye 1. Enerji Şurası - 7-9 Aralık 1998/Lütfi Kırdar Kongre ve Kültür Merkezi-Istanbul*



# Yakıt Hücreleri ve Uygulama Alanları

A.Demirören, H.L.Zeynelgil, E.B.Akten  
I.T.Ü.Elektrik-Elektronik Fakültesi  
e-mail:aysen@elk.itu.edu.tr

## ABSTRACT:

*Concerns over the environmental impact of existing sources of power are increasing throughout the world. How can we generate electric power which is clean, reliable and inexpensive in a way that is responsive to demands of our changing world? Fuel cells will play an important role for the answer of this question. In this study, it is summarized the current developing about of fuel cells applications.*

## GİRİŞ

1839'da keşfedilen, fakat uygun teknolojinin gelişmemesi ve enerji üretiminde baskın olan diğer teknolojiler nedeniyle uygulama alanına çok sonra belirli ihtiyaçlar nedeniyle temiz, güvenilir enerji vad ederek, parlak bir giriş yapan yakıt hücreleri, ilk önce Apollo ve Gemini uzay projelerinde astronotlara radyasyon tehlikesi olmadan elektrik ve yan ürün olarak da su üretiminde kullanılmıştır. Enerji üretiminden, ulaşım sektörüne kadar pek çok alanda kullanımının başarıyla mümkün olduğu görüldüğünden, teknolojiyi geliştirmede öncü ülkelerin ve araştırma kurumlarının ve çok uluslu elektrik ve ulaşım sektörünü elinde tutan şirketlerin son yıllarda üzerinde durdukları en önemli araştırma konusudur. Elektrik üretiminde 1990'lı yıllarda doğal gaz, kömürden türetilen gaz, atık ürünlerin gazları, gibi pek çok yakıtı kullanabilen yakıt hücreleri üzerindeki denemeler sürdürülmektedir. Halen uygulamada A.B.D., Japonya, ve Avrupa'daki bazı ülkelerde 200 kWlık santraller olarak, yüz adet civarında tesis mevcuttur. 1980'lerde Fosforik Asitli yakıt hücrelerinin (PAFC) incelenme aşamaları tamamlanmıştır ve bugün ticari kullanımdadırlar. 2010 yılına kadar endüstride 50MWlık ünitelerin incelemelerinin tamamlanacağı planlanmaktadır. Son beş yılda A.B.D. Enerji Bakanlığı (DOE) özellikle öncelikli programlarını yüksek sıcaklıklı yakıt hücreleri konusunda odaklamıştır ve bu konudaki araştırmaları desteklemektedir. Yüksek sıcaklıklı yakıt hücreleri Erimiş Karbonatlı Yakıt Hücreleri(MCFC) ve Katı oksitli Yakıt Hücreleri(SOFC)dır. Bu yakıt hücreleri daha yüksek verimli daha düşük maliyetli olup, mevcut santrallerle entegrasyonu çok daha kolaydır .

Diğer yandan, insan sağlığını tehdit eden düzeye gelen kirli havanın daha çok içten yanmalı motor kullanan ulaşım araçlarından kaynaklandığı bilinen bir gerçektir.

Bundan dolayı gelişmiş ülkeler bu konuda sınırlandırmalara yönelmektedir. Bir örnek, Kaliforniya eyaletinde satılan yeni taşıtların 1998 den başlayarak belirli bir oranda sıfır emisyonlu vasıtalar(ZEV) olma zorunluluğu getirilmiştir ve bu oran 2003 yılında daha da arttırılacaktır. Bu durumda otomobil imalatçılarının dikkatini akülü otomobillerden ziyade daha uzun dönem için çözüm olacağı açıkça görülen yakıt hücrelerini kullanan otomobil tasarımı çekmiştir. 1995 yılındaki Ballard/Daimler Benz ortaklığı bunun için bir dönüm noktası olmuştur. 1995 ve 1996 yıllarında Daimler Benz ilk yakıt hücresi kullanan otomobil prototip üretimlerinde bulunmuştur.

## YAKIT HÜCRELERİNİN ÜSTÜNLÜKLERİ

Özellikle elektrik üretimi başta olmak üzere pek çok sektörde yakıt hücrelerinin kullanımı, aşağıda sıralanan üstünlükleri nedeniyle gelecek vaat etmektedir:

**Çevresel etkiler:** Yakıt hücreleri, elektrik üretimini elektrokimyasal bir tek dönüşüm ile sağladıklarından gürültü kirliliği yok sayılabilir (60 dB 100 feet civarında) ve alışlagelmiş tesislerle karşılaştırıldığında asit yağmurlarına ve kirliliğe neden olan gaz yayılımı çok düşüktür ( $SO_x$  ve  $NO_x$  1.36 ve 0.13gr/MWh oranlarında olup,  $CO_2$  yayılımı da %40-60 oranında azaltılmıştır). Yakıt hücreleri büyük alanlara gerek duymadıklarından doğal alanların bunların yerleştirilmesi için büyük ölçülerde tahribine gerek yoktur. Ayrıca, alışlagelmiş yüksek basmçlı türbinlerle karşılaştırıldıklarında çok daha az su tüketirler.

**Verimlilik:** Alışlagelmiş herhangi bir santrale göre yaklaşık iki kat daha verimlidir. Bunun nedeni, elektrik enerjisinin elektrokimyasal olan tek bir dönüşüm ile elde edilmesi diğer üretim biçimlerinde olduğu gibi birden fazla dönüşümün söz konusu olmamasıdır. Yakıt hücresi tipine bağlı olarak değişmekle birlikte elektriksel verim %40-%60 arasındadır. Yakıt hücresi gaz türbini kombinasyonlarının verimi %70 civarındadır. Kogenerasyonda uygulandığında (ancak yüksek sıcaklığa sahip olanlarda) verimin %85 olacağı hesaplanmaktadır. Büyüklüklerinden ve yüklerinden bağımsız olarak sabit bir verimde çalışmaları da önemli bir özelliktir. Ulaşım sektöründe alışlagelmiş taşıt motorlarında bir galon

benzin %20 oranında enerjiye dönüşürken, yakıt hücresi kullanan taşıtlarda bu oran %84.

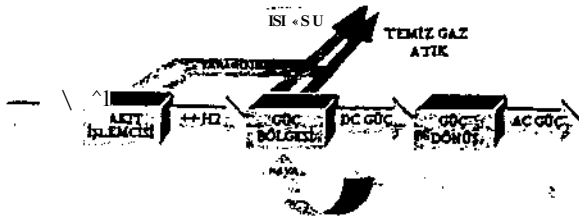
**Modülerlik:** Modüler bir yapıya sahip olduklarından, yakıt hücrelerinin çıkış büyüklüklerinin artırılması için, üretim biriminin hacmini büyütme yerine ilave hücre yığınları eklenerek sağlanır.

**Bakım:** Hareketli parçaları olmadığı için sık bakım gerektirmez. 4000 saatlik ömürlü küçük gruplar bu sürenin sonuna doğru %5-10 oranında performans kaybına uğramaktadırlar, bunun nedeni karbonun korozyonu ve elektrolit sızıntısıdır. Ömürleri 120000 saati geçen ve sorunsuz çalışan tipler mevcuttur.

**Kojenerasyon uygulaması:** Yüksek sıcaklığa sahip yakıt hücreleri kojenerasyon ısıtma ve soğutma için uygun olup verimin daha da artar.

**Yakıt Esnekliği:** Yakıt hücreleri doğal gaz, LPG, propan, kömür gazı, vs. gibi hidrokarbon içeren pek çok yakıt kullanılabilir. Bu işletme masraflarının önemli ölçüde düşük tutulmasını sağlayan bir özelliktir. Yakıt esnekliğinin anlamı birincil olarak kullanılan yakıtın mevcut olmadığı yada pahalı olduğu durumda bir diğerinin onun yerini alabilmesidir.

**Dağılım Üretim:** Elektiği merkezi bir alanda değil tüketicilerin talep ettiği uzak bölgelerde yada gelişmenin fazla olduğu bölgelerde üreten yakıt hücresi kullanan dağılım santralleri üretim, iletim ve dağıtım problemlerini bir ölçüye kadar yok eder yeni iletim hatları tesis etmeye gerek kalmaz, bunlardan doğan zararlı elektro-mağnetik etkiler de yok edilmiş olur. Yakıt hücreleri bu bölgesel dağılım merkezleri için ideal teknolojiyi sunarlar, çok daha büyük (1-100MW) lık merkezler için yakıt hücresi/gaz türbini sistemlerinin hizmet edeceği düşünülmektedir. Daha güvenilir, daha verimli, daha kullanışlı, daha temiz enerji ve gelecekle şimdi sahip olduğumuz tesislerden daha düşük maliyette elektrik enerjisi üretecek olan yakıt hücrelerinin geleceğin enerji kaynağı olarak görülmektedir.

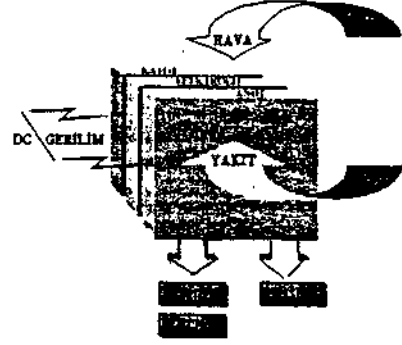


Şekil 1 Yakıt hücresi çalışma şekli

#### YAKIT HÜCRESİNİN ÖZELLİKLERİ:

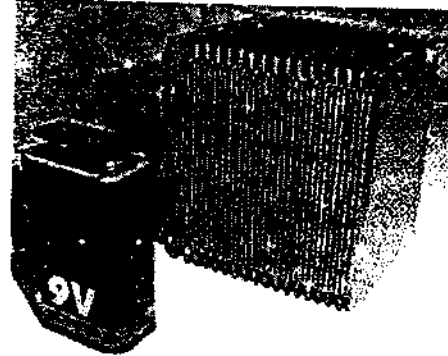
Yakıt hücreleri elektrik üretmede elektrokimyasal dönüşüm kullandıkları ve doğru akım ürettikleri için

pillere benzemelerine rağmen, enerjiyi depolamadıkları ve sadece hidrojen zengin yakıt sağlandığı süreçte elektrik ürettikleri için onlardan farklıdır. Elektrolit ile birbirlerinden ayrılan anot ve katot olarak adlandırılan iki elektrod vardır. Bunlar, hidrojen zengin yakıtın çektiği hidrojen iyonları ile oksijen atomlarını birleştirerek



Şekil 2 Bir yakıt hücresi şeması

elektrik üretirler. Hidrojen molekülleri yakıt hücresi anoduna girdikten sonra elektronlarından ayrılır ve pozitif yüklü iyon (proton) haline dönüşür. Bu proton elektrolitten katotuna geçer geçmez oksijen elektronları ile birleşerek su oluşturur. Anotta elektronların serbest kalması ve katotta tekrar yakalanması sonucu elektrik akımı oluşur. Bu reaksiyon elektrotları saran bir katalizör (genellikle Platin) ve protonları geçiren elektrolit tarafından kontrol edilmektedir. Sonuç her iki elektrotta da elektrik akımı, atık ısı, su buharı, ekzos ürünleridir. Dış devreden yüke verilen akım elektrodların büyüklüğü ile orantılıdır. Gerilim her bir hücrede 1 volt civarındadır.



Şekil 3. 9V'luk pil ile pilden elli kat güçlü 50W gücünde yakıt hücresini birarada şekillen

İstenilen güç seviyesine ulaşıncaya kadar, bu hücreler seri bağlanarak, yığılıştırılır. Güç üretimi için kurulan santrallerde her bir yığın yaklaşık 340 hücreden oluşturulur. Her bir yığın yakıt, hava ve elektrik bağlantısı sağlanmalıdır. Yakıt hücreleri teknolojileri elektrolit tipine göre isimlendirilerek birbirlerinden ayrılırlar.

**Fosforik Asitli Yakıt Hücresi (PAFC):** En olgun teknolojiye sahiptirler. Birçok ülkede tesis edilmiş olup, verimleri %40-50, çiraklıkları 100°C dir. Yakıt

olarak kullanılan doğal gazın hidrojen zengin gazla çevrilmesi yakıt hücresinin dışında olur, buyüzden karmaşık, yüksek maliyetli ve verimi düüktür. Hücre ömrü 4000 saattir.

**Erimiş Karbonatlı Yakıt Hücre(MCFC):** Tam ölçekli tesislerde denenmektedir. %60 oranında verime sahiptirler ve 650°C ta ve çevre basıncında veya biraz üstündeki basınç değerlerinde çalışırlar. Nikel bazlı elektrotlar nedeniyle daha ucuzdur. Bunlarda yakıtın hidrojen zenginleştirilmesi olan düzeltme reaksiyonu hücre yığınının içinde de oluşturulabilir, bu yeni teknoloji iç düzeltme olarak adlandırılır. Bu şekilde verim daha da yükselmiş olur. San diego da donanma tesislerinde 250kW lık doğal gaz yakıtlı MCFC güç santrali kurulmuş ve incelenmesine başlanmıştır.

**Katı Oksitli Yakıt Hücresi(SOFC):** 100 kW lık tesislerde incelenmesi devam etmektedir. 1000°C (iç düzeltmeyi sağlayan) gibi yüksek sıcakta çalışır, yakıt seçiminde esnekliğe izin verir. Elektrolit olarak zirkonyum kaplanmış seramik kullanıldığı için kombine çevrim uygulamaları için uygundur. Elektrolitin katı olması nedeniyle üstünlükleri vardır. Hücreler ya düzlem yada tüp şeklindedirler. Bunların üstünlükleri hücrenin doğasından gelen enerji dönüşümü ve diğer kullanımlar için yüksek kalitede ısıyı verebilecek çalışma sıcaklığına sahip olması ve hücre içinde gaz yakıtı düzeltme(hidrojen açısından zenginleştirme) potansiyeline sahip olmasıdır. SOFCde doğal gazın yanısıra metan gibi hidrokarbonlar da yakıt olarak kullanılır. Bunlar da kombine çevrim uygulamaları için uygundur. Atık ısı kojenerasyon uygulamalarında da kullanılırsa verim çok yükseltilebilir.

**Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresi(PEMFC):** Sadece hidrojen iyonlarını geçiren özel plastik zarı vardır. Bu zar yaprak görünümündedir ve platin kaplı karbon elektrotlarının bulunduğu anot ve katodu birbirinden ayırır. Bu tip hücrelerde katı elektrolit kullanıldığından sızıntı problemi yoktur. Protonlar zar vasıtasıyla geçer ve oksijenle birleşerek reaksiyonun atık ürünü olan suyu oluştururlar. Çalışma sıcaklıkları oldukça düşüktür(60-100°C). 1998 yılında Siemens-Ballard işbirliği ile dünyada en büyük PEM yakıt hücresi sistemini (8 ton ağırlığında) oluşturdu. 2003 yılından itibaren bu tip birimlerin normale göre 5 misli su altında kalmayı sağlayacağından, Alman donanmasında kullanılacağı ifade edilmiştir. Bu grubun öncüleri uzay gemilerinde kullanılmışlardır.

**Alkali Yakıt Hücresi:** İşletme sıcaklığı 200°C olan bu hücreler de henüz anıştırma safhasındadır. Verimleri %42-73 arasında değişir. Oldukça yüksek yük yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen, CO kirliliği çalışmayı olumsuz etkilediğinden, burada kullanılan hidrojenin saf olması gerekmektedir.

**Polimer Yakıt Hücresi:** Polimer elektrolit zar lityum pillerdeki elektrolite çok benzer. İmalatı kolaydır,

katalizörü platindir. 175°C da çalışır daha çok ulaşım amaçlı kullanılması söz konusudur.

Gündemde olan yakıt hücrelerinin karşılaştırmasını veren Tablo son sayfada sunulmuştur.

### **YAKIT HÜCRELERİ SİSTEMİ**

Yakıt hücresi sistemi bir yığından çok daha büyüktür. Bu sistem yakıt hücresi yığınının başka, bir yakıt işleyicisinden, yakıt hücresi güç bölümünden elde edilen elektrik gücünü DC den AC ye dönüştüren kısım ve atık ısının değerlendirilebileceği kojenerasyon sistemin içerir. Yakıt hücresi sisteminin tasarımında çok karmaşık amaçlar söz konusudur ve bu belli karmaşık tasarım kararlarının alınmasına neden olur. Yakıt hücresi güç sistemi tasarımında , emisyon seviyesi, tercih edilen yakıt, atık ısının potansiyel kullanımı, istenen çıkış güç seviyesi, ağırlık ve hacim gibi önemli parametreler vardır, yakıt işlemi ham yakıtta ve yakıt hücresinde kullanılan teknolojiye bağlıdır. Örneğin MCFC ve SOFC yakıt pilleri yakıt hücresi dahilinde su gaz karışım reaksiyonu yardımı ile CO 'I kullanma özelliğine sahipken , PAFC "y" %5 ten daha az CO içeren zenginleştirilmiş hidrojen verilir. Ayrıca SOFC ler ve dahili düzeltmeli MCFCler hücre içinde metan kullanma özelliğine sahiptir. Kirlilik sınırlarını da yakıt hücresinin teknolojisi belirler. Yakıt olarak doğal gaz kullanıldığında, bu gaz sülfür içerdiğinden hidrosülfürizasyonla sülfürün yok edilmesi gerekir. Ne yakıt hücresi, ne de hidrojen zenginleştiriciler sülfüre dayanamadıkları için sülfürün yok edilmesi gerekir.

### **GÜÇ ÜRETİMİNDE YAKIT HÜCRESİ**

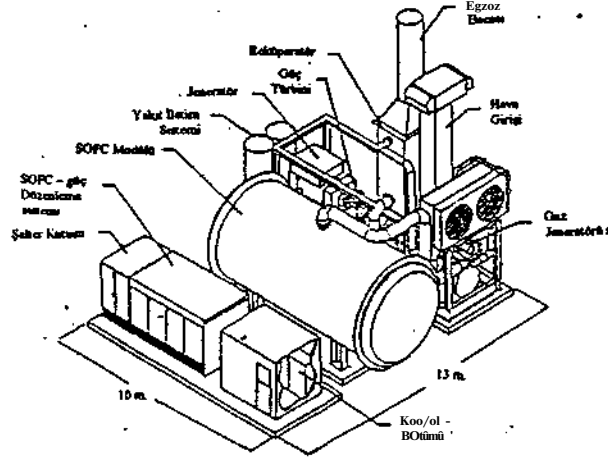
En yüksek verimli yakıt hücreleri bile, yakıtın enerjisinin hepsini elektrokimyasal dönüşüm ile elektriğe dönüştürmezler. Yakıtın yaklaşık %50 si elektriğe dönüştürülür. Kalan yakıt ikincil bir yanıcıda ısı enerji üretmek için tüketilir. Daha yüksek verim için atık ısı enerji düzeltilip ilave elektrik enerjisine dönüştürülmelidir.

DOE'nin Federal Enerji Teknoloji merkezi yakıt hücresi (SOFC ve MCFC) ve gaz türbini kombinasyonunun tesisi çalışmalarına destek sağlamaktadır. Yakıt hücresi gaztürbini kombinasyonu yüksek sıcaklıklı MCFC ve SOFC tipli yakıt pilleri ile gaz türbinin, hava kompresörünü, kombustörü, ve metalik ısı dönüştürücüsünü biraraya getirir.

Kombine yakıt hücresi/gaz türbini sisteminin sinerjik etkisi 10 MW'lık sistemde %72-74 lük elektrik dönüşüm verimi sağlamıştır. Gaz türbininden atılan yanma ürünü gazlardaki ısı enerjisini geri kazanmak için, basınçlı hava ve yakıt, metalik bir recüperatörden geçirilir. Isıtılmış yakıt ve hava sırasıyla elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleştiği yakıt hücresinin anot ve katot bölümlerine geçer.

Gaz türbini sisteminin alışılagelmiş yanma bölümünün değiştirilmesi ile türbin giriş sıcaklığı yükseltilir ve yakıt hücresi atık gazları karıştırılarak burada yakılır. F.

sayede, yakıt hücresi atık ısısının geri kazanılması için ekonomik bir yol sağlanmış olur. Gaz türbini daha yüksek dönüşüm verimi ile bu rolü oynar ve buhar türbininden daha ucuzdur.



Şekil 4 Yakıt hücresi/gaz türbini (3MW gücündedir ve yüksek basınçlı SOFC tipli yakıt hücresi kullanılmıştır)

#### ULAŞIMDA YAKIT HÜCRELERİ

İçten yanmalı motorlarla karşılaştırıldıklarında yok denecek kadar az atık ürettiklerinden yakıt hücresi kullanan otomobillerde çeşitli yakıtlardan hidrojeninin ayrılabilmesi için kullanıldığı aracın üzerinde bir ayırıcı sistem bulunması gerekir. Daimler Benz firması otomatik sektöründe konunun öncülerindedir. Kirliliğe neden olan egzoz gazların en çok otobüslerden kaynaklanması nedeniyle, 1994de ilk prototip otobüs çalışmaya başlamıştır. İkinci jenerasyon yakıt hücresi otobüslerin üretimi Ballard ve IFC şirketlerine verilmiştir. Bu otobüsler 135 beygir gücü üretebilen metanol yakıt hücresi güç kaynağıyla çalışmak üzere tasarlanmışlardır. 1999 yılı içinde bu otobüslerin üretimi tamamlanacaktır.

Yakıt hücresi Tipi	PAFC	MCFC	SOFC	PEMFC
İşletme sıcaklığı	190°C	650°C	1000°C	80°C
Güç yoğunluğu(W/kg)	120-180	20-30	15-20	350-1500
Yakıtlar	doğalgaz, işlenmiş metanol	doğal gaz	doğal gaz	doğal gaz, işlenmiş metanol
Yönetim	dışardan	dışardan/içerden	dışardan/içerden	dışardan
Katalizör	O <sub>2</sub> /hava	CO <sub>2</sub> /hava /O <sub>2</sub> /	O <sub>2</sub> /hava	O <sub>2</sub> /hava
Platin kullanımı	var	yok	yok	var
<b>Ticari Kullanım</b>	1992-1993	1998	2000	1998
Verim	%40-50	%50-60	%45-55	%40-50
Elektrolit	fosforik asit	erimiş * karbonat tuzu	seramik	polimer zar

Tablo Çeşitli Uygulamaları ile gündemde olan yakıt pilleri ve özelliklerinin karşılaştırılması

#### SONUÇ

Teknolojik ilerlemelere paralel olarak talep edilen enerjiyi ekolojik dengeleri bozmadan, verimli, kolay bulunan yakıtlar vasıtasıyla, işletme kolaylığına yönelik olarak sağlayacağı görülen yakıt hücreleri 21. yüzyıl başlarında dünyanın en önemli sorunlarından olan enerji ve kirlilik sorununa bir arada çözüm ürettiği için, geleceğin gücü olarak düşünülmektedir. Bu alandaki çalışmalar teknolojik olarak öncü ülkelere desteklenmekte ve çok uluslu şirketler tarafından sürdürülmektedir. Bu incelemede geleceğin enerji kaynağı olarak görülen yakıt hücreleri konusu özetlenmiş ve uygulama alanlarındaki son gelişmeler özetlenmiştir.

#### KAYNAKÇA

1. Ballard Power System, Inc., *Annual Report 1995*
2. DOE (Department of Energy Office) *Advanced Fuel Cell '96 Review Meeting, Aug, 1996*
3. *Research and Innovation 11/98 Siemens*
4. M.C. Williams, C.M. Zeh, *Proceeding of the workshop on Very High Efficiency Fuel Cell/Gas Turbine Cycle, DOE, METC-96/1024, Oct*
5. Rioji Anahara, Sumoi Yokohowa, M. Sakura, *Present Status and Future Prospects for Fuel Cell Power Systems, Proc. IEEE B, No3, Mart, 1993*
6. <http://www.fetc.doe.gov/products/power7fuelcells>
7. <http://www.e-sources.com/fuelcell/fcexln.html>

# LOŞLAŞTIRILABİLİR BALASTLI SİSTEMLERDE LOŞLUK SEVİYESİNİN ELEKTRİKSEL VE IŞIKSAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Önder GÜLER, Nesrin ÇOLAK, Sermin ONAYGİL

I.T.Ü Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Müh.Böl.

80626 Maslak İSTANBUL

E-mail: onder@elk.itu.edu.tr

## ABSTRACT

*By using control systems, which adjust the artificial illuminance related to the daylight, energy can be saved. in fluorescent lamp systems this profit can be realized only with dimmable electronic ballasts. The luminous flux of the fluorescent lamp changes by control voltage. However, when the luminous flux of fluorescent lamp is changed by dimming, power factor, efficacy of lamp and total harmonic distortion are also changed. in this study, by using 36JV/54 fluorescent lamp and dimmable electronic ballast some experiments are done. The results are given graphically.*

## 1.GİRİŞ

Gün içinde uzun saatler boyunca yapay aydınlatmaya ihtiyaç duyulan ticari binalar, okul gibi yapıların aydınlatılmasında floresan lambaların kullanılması kaçınılmazdır. Etkinlik faktörlerinin yüksek olması, değişik ışık rengi ve renksel geriverim özelliklerinin bulunabilmesi açısından farklı ihtiyaçlara cevap verebilmeleri nedeniyle, floresan lambalar günümüzde iç aydınlatmada en çok kullanılan ışık kaynaklarıdır. Deşarj prensibine dayalı ışık üreten floresan lambalarda, akımı sınırlamak ve çalışma gerilimini sağlamak amacıyla mutlaka bir yardımcı elemana (balast) ihtiyaç vardır.

Son yıllarda, çeşitli üstünlükleri nedeniyle manyetik balastların yerine elektronik balastlar kullanılmaya başlanmıştır. Elektronik balastların özel tipleri ile floresan lambaların ışık akılarına da kumanda edilebilmektedir. Bu özellik sayesinde, aydınlatma kontrol sistemleri ile yapay aydınlatma doğal aydınlatmaya göre ayarlanarak önemli ölçüde enerji tasarrufları elde edilebilmektedir.

Diğer yandan, kataloglarda balast ve floresan lambaların farklı loşluk seviyelerinde kullanılmaları halindeki, elektriksel ve ışıksal özellikleri hakkında detaylı bilgilere rastlanamamaktadır. Mevcut bilgiler ve değerler, nominal çalışma durumuna aittir.

Yaygın olarak kullanılmaya başlanılan loşlaştırılabilir elektronik balastların, floresan lambaların elektriksel ve ışıksal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Aydınlatma-İç Tesisat Laboratuvarında gerçekleştirilen bir dizi deney sonucunda bu bildiri hazırlanmıştır.

## 2. LOŞLAŞTIRILABİLİR ELEKTRONİK BALASTLARIN YAPISI

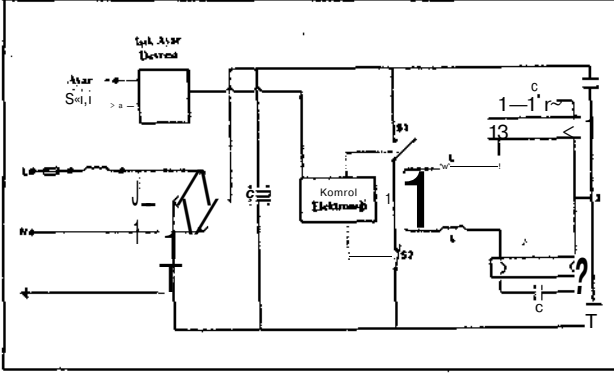
Enerji tasarrufu ve rahat ortamlar yaratılabilmesi açısından son yıllarda yaygın olarak kullanılan yüksek frekanslı elektronik balastların manyetik balastlara göre üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Lambanın ve tüm aydınlatma sisteminin etkinlik faktörünü artırır,
- Işık titreşimlerini ve stroboskopik olayları önler,
- Startere gerek kalmadan lambanın ani ateşlenmesini sağlar,
- Lambanın ömrünü uzatır,
- Kompanzasyona gerek kalmayacak şekilde sistemin güç faktörünü yükseltir,
- Işık akısının istenilen oranda azaltılıp, çoğaltılmasına imkan verir,
- Sıcaklık yükselmesi az olduğundan ısı kayıpları da azalır. Buna bağlı olarak soğutma giderleri ve yangın tehlikesi de azalır,
- Uğultu ve vızıltı gibi gürültülerin oluşması önlenir,
- Hafifirler. Bu durum armatür ve tavan tasarımında kolaylık sağlar,
- Bir balastla iki lamba çalıştırılabilmesine olanak verir,
- Sistem doğru gerilimle de beslenebilir,
- Balast güç kayıpları azalır.

Uygulanan kontrol gerilimine bağlı olarak floresan lambanın ışık akısının ayarlanmasına imkan veren loşlaştırılabilir elektronik balastların elemanları;

- Alçak geçiren filtre
- Doğrultucu
- Süzme kondansatör
- Yüksek frekans güç osilatörü
- Lamba stabilizasyon devresi
- Işık ayar devresi

olarak sıralanabilir. Loşlaştırılabilir elektronik balastların devre diyagramı ise Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1 Loşlaştırılabilir elektronik balastların devre diyagramı

Bu sistemde şebeke gerilimi diod köprüsü tarafından doğru gerilime çevrilmektedir. Doğrultucu, kondansatörü 280V a kadar şarj eder. Bu doğru gerilim 28 kHz' de anahtarlama yapan S<sub>1</sub> ve S<sub>2</sub> elektronik yarı iletken elemanlar ile 280V luk yüksek frekanslı kare dalgaya çevrilir, bu gerilim ile stabilizasyon devresi ve seri bağlı olan floresan lamba sistemi beslenir.

Loşlaştırılabilir elektronik balastlarla, akımın frekansını değiştirmek suretiyle floresan lambanın ışık akısını %1 ile %100 arasında ayarlamak mümkündür. Loşlaştırma işlemi, uygulanan kontrol gerilimine bağlı olarak, elektronik elemanların frekansını değiştirmekle sağlanır. Genelde balastın içinde üretilen kontrol gerilimi 1-1 OV arasındadır. Bir potansiyometre kullanılarak pasif kontrol veya ışık sensörleri yada uzaktan kumanda sistemleri kullanılarak aktif kontrol yapılabilir [1].

### 3. DOĞAL AYDINLATMAYA BAĞLI KONTROL SİSTEMLERİ

Yapay aydınlatmanın doğal aydınlatmaya bağlı olarak, hacim içindeki toplam aydınlık düzeyi istenilen bir değerde sabit kalacak şekilde ayarlanması ile %50'lere varan enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [2]. Doğal aydınlatmaya bağlı kontrol sistemlerinde bir ışık algılayıcısı yardımıyla, kullanılan kontrol stratejisine bağlı olarak hacim içindeki doğal veya toplam aydınlık düzeyi değeri ölçülerek yapay aydınlık düzeyi Şekil 2'de gösterildiği gibi,

$$E_{t \text{ toplam}} = E_{\text{doğal}} + E_{\text{yapay}} \quad (D)$$

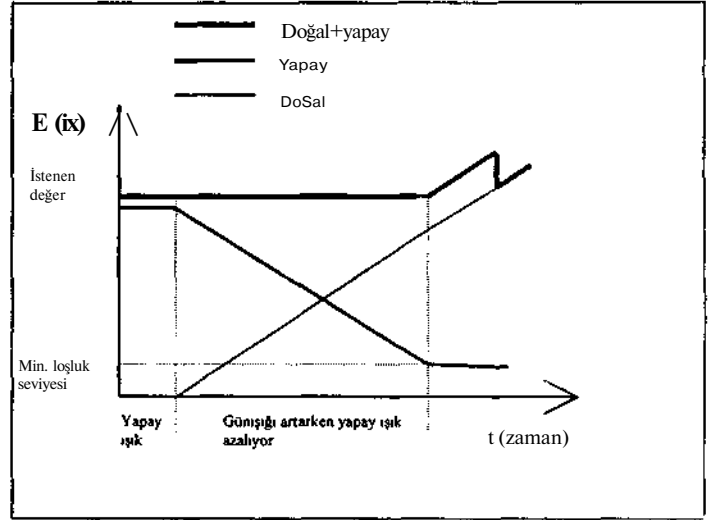
olacak şekilde ayarlanmaktadır. Işık algılayıcısının çıkış sinyaline bağlı olarak,

**8 =1 Yapay aydınlatmanın tümüyle devrede**

**8 =0 Yapay aydınlatmanın tümüyle kapalı**

olduğu duruma karşılık gelmek üzere, lambaların loşluk seviyeleri (8) belirlenip, lambaların kontrol gerilimleri ayarlanarak istenilen ışık akısı elde edilmektedir [3],[4].

Aydınlatmanın floresan lambalarla sağlandığı hacimlerde, söz konusu kontrol ancak loşlaştırılabilir elektronik balastların kullanılması ile mümkündür.



Şekil 2 Yapay aydınlatmanın doğal aydınlatmaya bağlı olarak kontrolü

### 4. LOŞLUK SEVİYESİNİN ELEKTRİKSEL VE İŞİKSAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ

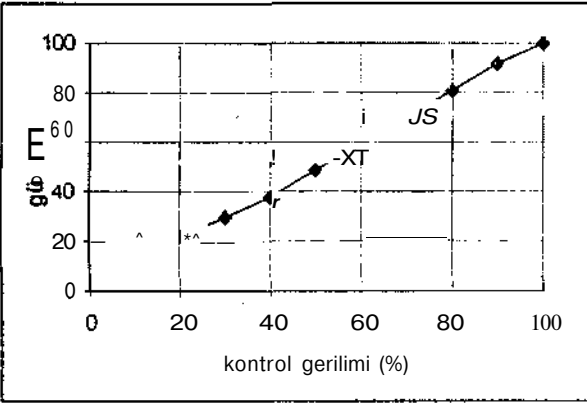
Bu çalışmada, loşlaştırılabilir elektronik balastlı floresan lamba sistemlerinde; çekilen gücün, güç faktörünün, sistemin ürettiği harmoniklerin, ışık akısının ve etkinlik faktörünün loşluk seviyesine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Loşluk seviyesi kontrol gerilimine bağlı olarak ayarlandığı için, loşluk seviyesi yerine kontrol gerilimi esas alınmıştır. Çalışmada 36V/54 tipi floresan lamba ve 36W lık loşlaştırılabilir yüksek frekanslı elektronik balast kullanılmıştır. Balast kontrol gerilimi 1-10V arasında ayarlanabilmektedir.

4.1 Loşluk Seviyesinin Elektriksel Büyüklüklere Etkisi  
Fluoresan lamba ve balastlar hakkında kataloglarda verilen ve üzerinde belirtilen akım, güç, güç faktörü gibi büyüklükler nominal çalışma durumundaki değerlerdir. Fakat kataloglarda farklı loşluk seviyelerindeki değerler hakkında herhangi bir bilgiye rastlanamamaktadır. Bu değerleri araştırmak amacıyla kontrol gerilimi 1-1 OV arasında değiştirilerek, her bir gerilim kademesi için söz konusu büyüklüklerin değişimleri incelenmiştir. Farkı,

kontrol gerilimleri (loşluk seviyeleri) için akım ve güç değerleri ölçülmüştür. 36W'lık floresan lamba için farklı kontrol gerilimlerinde ölçülen akım ve güç değerleri Tablo 1' de toplu olarak verilmiştir. Sistemin çektiği gücün kontrol gerilimine bağlı olarak değişimi ise Şekil 3' de gösterilmiştir.

Tablo 1 36W'lık floresan lamba- balast sisteminin kontrol gerilimine bağlı olarak akım ve güç değerleri

Kontrol Gerilimi (V)	Akım (A)	Güç (W)
10	0.17	37
9	0.16	34
8	0.14	30
7	0.12	26
6	0.11	22
5	0.09	18
4	0.07	14
3	0.06	11
>	0.05	8
1	0.04	6



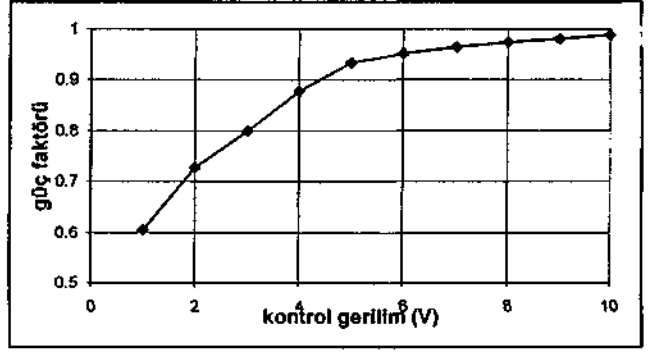
Şekil 3 Çekilen gücün kontrol gerilimine bağlı olarak değişimi

Bilindiği gibi, güç faktörü gerilim ile akım arasındaki faz farkının kosinüsüdür. Sistemin gereksiz yüklenmesini önlemek için bu değer 1'e yakın olması istenir.

Farklı loşluk seviyelerinde sistemin güç faktörü. Tablo 1'de verilen akım ve güç değerleri kullanılarak,

$$\cos\phi = \frac{P}{U \cdot I} \quad (2)$$

ifadesi ile hesaplanmış ve güç faktörünün kontrol gerilimine bağlı olarak değişimi Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, nominal çalışma durumunda 0.0K olan güç faktörü, lamba loşlaştırıldıkça azalmaktadır.



Şekil 4 Güç faktörünün kontrol gerilimine bağlı olarak değişimi

Güç faktörü yüksek olduğundan, elektronik balastlı floresan lamba uygulamalarında ayrıca kompanzasyon gerekmemektedir. Fakat lambaların düşük kontrol gerilimlerinde çalışmaları halinde yani sistemin ışık akısının azaltılması durumunda, güç faktörünün de azalması özellikle büyük sistemlerde önemli ölçüde reaktif güç harcanmasına neden olacaktır.

Yüksek frekanslı elektronik balastlar gerekli filtre devreleri ile birlikte donatıldıklarında, şebekede herhangi bir bozucu etkiye (harmoniklere) sebep olmazlar. Ancak yapılan ölçümler sonucu, loşlaştırma işlemi yapıldığında uygulanan kontrol gerilimine bağlı olarak akımdaki toplam harmonik distorsiyonunda da (THD) bir artış olduğu görülmüştür. Kontrol gerilimine bağlı olarak akım için ölçülen THD değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Harmonik distorsiyonu

Kontrol gerilimi (V)	THD (%)
10	20.63
9	21.13
8	23.65
7	26.81
6	31.89
5	32.49
4	39.54
3	48.73
1	64.69
1	73.9

#### 4.2 Loşluk Seviyesinin Aydınlatma Büyüklüklerine Etkisi

Etkinlik faktörü, kaynakların ışık üretimini karakterize eden en önemli ekonomik faktörlerden biridir. Etkinlik faktörü ne kadar büyükse, sistemin işletme masrafları da o kadar azalır. Bir ışık kaynağının etkinlik faktörü, kaynaktan çıkan toplam ışık akısının (>) kaynağın gücüne (P1) oranı, yani

$$e = \frac{\cdot k}{P_L} \quad (3)$$

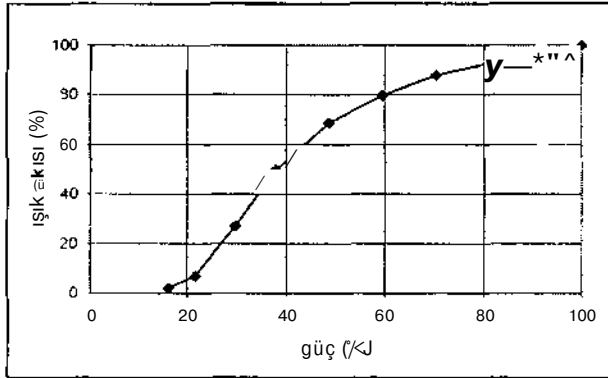
olup, birimi lm/V'dır [5].

Gazlardaki deşarj olayına dayalı ışık üreten fluoressan lambaların çalışma prensipleri gereği, mutlaka bir balast ile birlikte kullanılmalrı gerekmektedir. Bu durumda, balast da şebekeden ayrı bir güç çekmektedir. Bu nedenle ekonomik değerlendirmelerde, (3) denklemindeki lamba gücü yerine, lamba-balast sisteminin toplam gücü ele alınmalıdır. Bu durumda sistemin etkinlik faktörü, balast kaybı da ( $P_B$ ) dikkate alınarak,

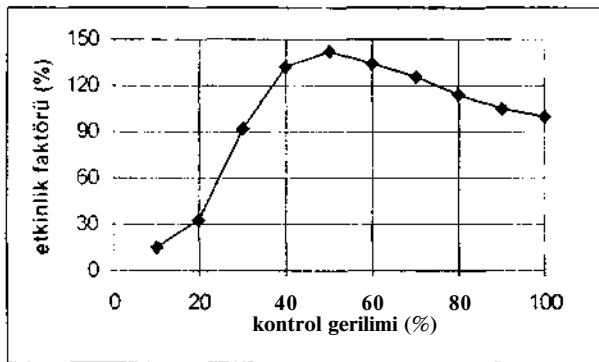
$$c = \frac{\phi_L}{P_L + P_B} \quad (4)$$

olacaktır.

Ulbricht küresinde gerçekleştirilen ışık akısı ölçümleri sonucunda lambanın çektiği güce bağlı olarak ışık akısındaki ve kontrol gerilimine bağlı olarak da etkinlik faktöründeki değişimler belirlenmiştir. Deneylerde, kontrol gerilimi ayarlanarak farklı loşluk seviyelerinde lambanın verdiği ışık akısı değerleri ölçülmüştür. Işık akısının güce bağlı olarak değişimi Şekil 5'de, etkinlik faktörünün kontrol gerilimine bağlı olarak değişimi ise Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5 Işık akısının güce göre değişimi



Şekil 6 Etkinlik faktörünün kontrol gerilimine göre değişimi

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda, enerji tasarrufu ve konforlu ortamlar yaratmak amacıyla kullanılan loşlaştırılabilir elektronik balastların loşluk seviyeleri düşürüldükçe, lambanın şebekeden çektiği toplam gücün de hemen hemen aynı oranda azaldığı görülmüştür. Fakat sistemin nominal gerilimde (kontrol gerilimi %100 iken) 0,98 olan güç faktörü, gerilim azaldıkça düşmektedir. Güç faktöründeki azalma, özellikle %50'lik loşluk seviyelerinin altında hızlı bir düşüş göstermektedir, %10'luk loşluk seviyelerinde güç faktörü 0,6 değerine inmektedir. Bu nedenle, %50'den düşük loşluk seviyeleri kullanılırken sistemin güç faktöründeki düşüşler nedeniyle ilave reaktif güç de harcadığı dikkate alınmalı, buna uygun önlemler düşünölmelidir.

Deney sonuçlarından, gerekli filtre devreleri ile donatılmış bir elektronik balastın nominal gerilimde şebekeye bozucu bir etkisinin olmadığı, fakat gerilim azaldıkça bozucu etkilerin de arttığı anlaşılmaktadır.

Kontrol gerilimi azaldıkça, yani loşluk seviyeleri düşürüldüğünde, güce benzer şekilde lambanın ışık akısının da azaldığı Şekil 5'deki grafikten görölmektedir. Fakat ışık akısındaki azalma, güçteki gibi lineer olarak gerçekleşmemektedir. Bunun sonucu olarak da, ışık akısının güce oranı olarak verilen etkinlik faktörü sabit kalmamakta, Şekil 6'daki gibi bir değişim göstermektedir. Şekildeki eğriden, etkinlik faktörünün, %50'lik loşluk seviyelerinde bir maksimum gösterdiği, fakat bu seviyenin altında hızla azaldığı anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada tek bir lamba ve balast tipi ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda, %50'lik loşluk seviyelerinin altındaki kullanımlarda, loşlaştırılabilir elektronik balastların kullanıldıkları sistemlerde güç faktörü ve etkinlik faktörünün azaldığı, harmoniklerin ise arttığı görülmüştür. Bu nedenle, düşük loşluk seviyeli uygulamalarda, sistemlerden beklenen enerji tasarruflarının elde edilebilmesi için ilave önlemler alınmalı ve dikkatli davranılmalıdır. Şüphesiz kesin sonuçların söylenebilmesi için, değişik renk ve güç özellikli lambalar ve farklı balastlarla deneylerin tekrarlanması gerekmektedir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Onaygil, S., Güler, Ö., "Yüksek Frekanslı Elektronik Balastlar", I. Ulusal Aydınlatma Kongresi, s.200-207. İstanbul, 1996.
- [2] Rubinstein, F. M., Siminovitch, M., Verderber, R., "Fifty Percent Energy Saving with Automatic Lighting Controls" IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.29, No.4, pp.768-773, July-August, 1993.
- [3] Demir, N., Onaygil, S., "Kompleks Binalarda Aydınlatmanın Kontrolü" 3e Dergisi, sayı. 17, s.66-69, Ekim, 1995.
- [4] Çolak, N., "Ofis Aydınlatma Kontrol Sistemlerinde Kullanılacak Verilerin Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi", Doktora Tezi, İTÜ, 1999.
- [5] Özkaya, M., "Aydınlatma Tekniği", Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.



# ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE YÜK ARTIŞLARININ GERİLİM KARARLILIĞINA ETKİLERİ

Hakan Atabek Yılmaz Uyaroğlu M.Ali Yalçın Etem Köklükaya  
Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü ADAPAZARI  
e-mail:hatabek@esentepe.sau.edu.tr

## ABSTRACT

Today power systems are large and widely interconnected, probably the most complex man-built systems. The purpose of the transmission network is to pool power plants and had centers in order to supply the load at required reliability and maximum efficiency at a low cost. It is well known that there is strong relations between true power (P) and load angle (S), reactive power (Q) and load voltage magnitude (V). In this context classical stability analysis can be based on the investigation of P - S relation, and the voltage stability analysis on the investigation of Q - V relation. The voltage stability can be defined as the ability of the system to maintain the bus voltage magnitudes within the specified limits either under the steady-state or the transient conditions. The most interesting point on the curves is the singularity point for which there exists only one voltage value versus power. The voltage at this particular point is referred to as "Critical Voltage,  $V_{crit}$ ", and the power as "Critical Power,  $P^*$ ", these values define the boundaries of steady-state voltage stability. At the end of study is, the critical power and voltage values by result of load increase are observed with applying load flow on actual example (system from North-West Anatolia (KBA) from Türkiye) energy transmission system. With increasing the load; critical power is decreased and critical voltage is increased.

## 1.GİRİŞ

Gerilim kontrol ve kararlılık problemleri elektrik enerji iletim sistemlerinde yeni görülmektedir fakat şimdi çoğu sistemde özel dikkat gösterilmektedir. Öncelikle zayıf sistemlerde ve uzun hatlarda alakalı olduğundan, gerilim problemleri daha ağır yüklenmelerin bir sonucu olarak ileri düzeyde gelişmiş sistem ağlarının (enterkonnekte sistem) bir ilgi kaynağı teşkil etmektedir. Son yıllarda, gerilim değişkenliği çoğu enerji sistem ağının çökmesine sebep olmuştur [2].

Bilinen klasik anlamdaki kararlılık incelemeleri, aktif güç - yük açısı (P- $\delta$ ) ilişkisinin önemine karşılık, gerilim kararlılığı açısından, reaktif güç - gerilim genliği (Q- V) ilişkisi ön plana çıkmaktadır, özün mesafelerde büyük miktarda güç iletimi gerçekleştirildiğinden bu ilişkinin (Q-V) yönünden ayrıntılı olarak incelenmesi ihtiyacını doğurmuştur.

Gerilim kararlılığının incelenmesinin ilk yolu sürekli hal gerilim kararlılığına, yani statik yük akışı analizlerine dayanmaktadır. Elde edilen değerler genellikle, aktif güç - gerilim ordinatlarında P-V eğrileri ile gösterilmektedir.

P- V eğrisi üzerinde gerilimin kararsızlık noktası, kritik güç değerleri rahatlıkla incelenebildiğinden, statik analizlerde gerilim çökmesinden korunmak için faydalı olmaktadır. Ancak statik yük akışı, gerilim kararlılığının dinamik davranışı hakkında yeterli bilgi veremeyeceğinden, dinamik yük akışında göz önüne alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada sadece sürekli hal gerilim kararlılığında, sistem yüklerinin periyodik bir şekilde artırılması sonucunda oluşan statik yük akışı incelendiğinden dinamik simülasyon metodu inceleme kapsamına alınmamıştır.

Nüfus artışı, ekonomik gelişmeler, gelişen teknoloji sonucu olarak ülkemizde elektrik enerji talebi hızla yükselmektedir. Yıllık olarak yaklaşık % 10' luk bir enerji artış talebi bulunduğu ülkemizde bu artışın yakalanarak önüne geçilmesi en önemli hedeflerden biridir [5].

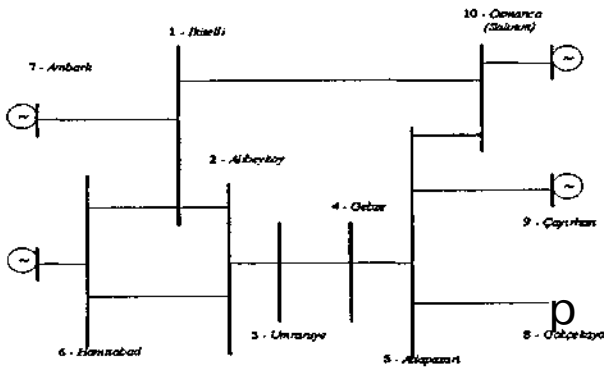
Yukarıdaki açıklamaların ışığında, bu çalışmada, yıllık % 10' luk enerji artışı talebini 10 yıllık bir periyot içinde gerilim kararlılığı yönünden statik yük akışı incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemede çeşitli kombinasyonlar denenmiştir. İlk önce; mevcut sistemde bu süre zarfında hiç bir iyileştirme yapılmadığı kabul edilerek yük akışı yapılmış ve gerilim kararlılığı incelenmiş. Daha sonra ise; yük artışına cevap verecek şekilde çeşitli üretim artışları gerçekleştirilerek yük akışı yapılmış ve gerilim kararlılığı incelenmiş. En son olarak ise iletim hatlarının taşıma kapasitelerinin % 100 artırıldığı kabulü ile yine yıllık % 10'luk enerji artışı talebi 10 yıllık bir periyot içinde incelenerek yük akışı yapılmış ve gerilim kararlılığı incelenmiştir [1].

## 2.ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI

Çalışmanın bu aşamasında çok generatörlü ve çok yüklü sistemlerin enterkonnekte yapı içerisinde iken gerilim kararlılığı açısından incelenmesi yapılacaktır. Ancak son yıllarda, kararlılık yönünden yapılan incelemeleri belirli bir grupta toplamak mümkündür

Bu gruplar, sürekli hal (statik) kararlılık metotları ve dinamik kararlılık metotları olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır. İncelemesini yaptığımız, sürekli hal kararlılığı aşağıdaki çalışma grubu içinde incelenmiştir.

Statik motorlar içinde ilk olarak Newton-Raphson yük akışı analizleri yer almaktadır. Bu analizle, kararlı bir çalışma noktasından itibaren, yük sonlu adımlarla artırılmış



Şekil 1. İndirgenmiş Kuzey Batı Anadolu (KBA) sistemi

Tablo 1. Kuzey Batı Anadolu sisteminin baraları

PQ (YÜK) BARALARI	PV (ÜRETİM) SARALARI	SALININ BARASI
İkitelli	Ham itabad	Osmanca
Alibeyköy	Ambarlı	
Ümraniye	Göcekaya	
Adapazarı	Çayıran	
Gebze		

Tablo 2. İndirgenmiş KBA sistemine ait hat verileri

Hat No	Baradan-Baraya (p-q)	(Zpq) Hat Empedansı		Hattın Şönt Admitansı Ypq (G.B)
		Omik Direnç (R)	Endüktans PO	
1	1-2	0.000180	0.002142	0,0.131028
2	1-6	0.003540	0.032713	0, 0.363255
3	1-7	0.000550	0.005089	0,0.056193
4	1-10	0.003670	0.042188	0,0.692991
5	2-3	0.000310	0.003692	0, 0.225897
6	2-6	0.002405	0.027634	0, 0.453925
7	3-4	0.000385	0.003560	0, 0.157459
8	4-5	0.001049	0.009710	0, 0.429503
9	5-8	0.002405	0.022275	0, 0.246284
10	5-9	0.003265	0.029887	0, 0.338289
11	5-10	0.001588	0.014463	0, 0.168657

#### 4. YÜKLERİN YILLIK % 10 ARTIŞLARININ BİLGİSAYAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

Çok-baralı sisteme örnek teşkil etmesi için incelenilen Kuzey Batı Anadolu (KBA) enerji iletim sistemi, hat ve generatör değerlerinden görüleceği gibi oldukça büyük kapasiteli bir sistemdir.

Öncelikle, mevcut hat ve generatör değerlerine göre sistemin yük akışı yapılarak nominal değerlerindeki gerilim güç ve yük açısı değerleri ve her yük barası tek tek yüklenerek, her yük barası için kritik değerler olan kritik güç ( $P_{crit}$ ), kritik gerilim ( $V^*$ ) ve kritik yük açısı ( $\delta_{crit}$ ), hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3 de verilmiştir.

Tablo 3. Mevcut hat ve generatör değerleri ile yük akışı ve kritik değerler (Baz güç  $S_{baz}=100MVA$ )

bara no	Güç (P) (pu)	Gerilim (V) (pu)	Açı $\delta$ (derece)	Kritik Gerilim (Vkrt) (pu)	Kritik Yük Açısı (Sb.) (derece)	Kritik Güç (Pkrt) (pu)
1	3.9160	1.0072	1.5873	0.6178	28.2770	19.2340
2	3.1940	1.0042	1.9992	0.7580	23.1213	17.0130
3	3.2140	0.9980	2.8714	0.8565	21.8200	15.0360
4	3.5650	1.0000	3.0880	0.7449	21.0170	23.4540
5	4.3210	1.0209	1.8053	0.8019	34.0322	48.5220

Mevcut sistem üzerindeki yıllık % 10 yük artışlarıyla birlikte, sistemde iyileştirme yapıldığı kabulü ile üretim haralarında da aynı oranda yani yıllık % 10 artırılması, kritik gerilim ve kritik güç değerlerinin bu artışlarındaki değişimleri incelenmiştir.

Elde edilen değerlerden görüleceği gibi, sistemin yıllık % 10 yük artışlarına karşılık, üretim baralarında yıllık aynı artış oranında artırılmasına rağmen kritik güç değerleri düşmektedir. Yani üretimdeki artış, yük artışları ile aynı oranlarda olmalarına rağmen artan yükü karşılayamamaktadır. Kritik güç değerlerindeki düşüş bir önceki incelemede olan sadece yük artışlarındaki kritik güç değerlerinde olmayıp, onlara yakındır. Bu değerler bu incelemede yaklaşık olarak % 10 daha iyidir.

Kritik güç değerleri bakımından sistemi incelediğimizde; yük haralarını kritik güç bakımından büyükten küçüğe doğru sıralamak gerekirse, nominal değerlerde elde edilen kritik güçlere göre yük baraları 5-4-1-2-3 şeklinde sıralanmaktadır. Yük haralarına ve üretim haralarına yıllık % 10 bazında artış yaptığımızda, bu sıralama yük artışlarının % 40'na kadar korunmakta, % 40'lık artışta sıralama 5-1-4-2-3 olmakta, % 70'lık yük artışında bu sıralama 5-4-1-2-3 olmakta, % 100'lük artışta ise 5-1-4-3-2 şeklinde sıralanmaktadır. Kritik güç düşüş değerleri ise nominal kritik güç değerlerine göre, % 30'lık yük ve üretim artışında; en çok 5.barada, en az 3.barada meydana gelmekte, % 50'lık yük ve üretim artışında; en çok 4.barada, en az ise 3.barada, % 80'lik yük ve üretim artışında ise, yine en çok 4.barada, en az ise 3.barada güç değişimleri gerçekleşmektedir. % 100'lık yük ve üretim artışında ise kritik güç değerleri nominal kritik güç değerlerinin 1 nolu barada %50.77'si, 2 nolu barada % 46.64'ü, 3 nolu barada % 53.77'si, 4 nolu barada % 33.44'ü ve 5 nolu barada % 37.96'si olarak meydana gelmektedir. En çok kritik güç düşüşü 5 nolu barada, en az 3 nolu barada gerçekleşmektedir.

Kritik gerilimler ise, elde edilen değerlerden sistem yükü ve üretim değerlerindeki yıllık % 10 artışlarla 10 yıllık bir süre içinde, yük ve üretim artışlarındaki değere göre orantısal şekilde % 10-30

ve her noktada sistemin durumu yük akışı çözümü ile belirlenmiştir.

Arttırma işlemi Newton-Raphson metodunun iraksadığı noktaya kadar sürdürülmüştür. Iraksamadan bir önceki nokta sistemin kritik değerleri olan kritik gerilim ve kritik güç değerleri olarak tespit edilmiştir. Iraksamanın nedeni ya kritik gerilim noktasına yaklaşıldığı için veya nümerik problemler nedeniyle olmaktadır [4].

Bu metotların hesaplamaları bilgisayarda yapıldığı göz önüne alınır, genel olarak bu metotların aşağıdaki bir kaç dezavantajları içerdiği görülebilmektedir.

Bazı metotlar sadece iki baralı sistem çözümlerini kullanmışlardır ki bu çok baralı ve çok generatörlü devreler açısından sakıncalıdır.

Bazı metotlarda ise, reaktif güç üretim limitleri hesaba katılmamıştır. Bu gerilim çökmesini hızlandıran en önemli faktördür.

Bazı çalışmalar ise, yük-akışı sonlu adımlarla tekrar edilerek kritik noktaya ulaşmak istenmektedir. Bu olay Newton-Raphson yük akışı yönteminde kritik gerilim noktasında bazı önlemler alınmadıkça güvenli olmayan sonuçlar verecektir. Bunun nedeni ise, çoklu yük akışı çözümlerinin kritik nokta civarında birbirine yakın olmasıdır [3].

Bu çalışmada, statik yük analizlerine dayalı gerilim kararlılığı incelenerek, yukarıda bahsedilen metotlardan sürekli yük akışı metodu uygulanacaktır. Buna göre sistemin yükü sabit tutularak sadece ilgilenilen barada her adımda yük arttırılarak yük akışı (sonlu adımlarla) tekrar edilerek kritik noktaya ulaşılmıştır.

Statik gerilim kararlılığında kullanılan Newton - Raphson metodunun, incelenilen sistemin kararlı çalışma koşullarının dışında, aşağıda sıralanan başlıca Uç koşul durumlarında bazen yakınsama ile ilgili problemler çıkardığı bilinmektedir. Bu koşullar;

a - Sistem yükünün fazla olması,  
b - Enerji iletim hatlarında  $R_h / X_n$  oranının yüksek olması,  
c -Yük akışında P-Q / P-V bara oranının yüksek olması, salınım barasının seçimi, başlangıç koşullarının seçimi şeklinde sıralanabilir. Bunların dışında büyük yüzdeli seri ve şönt kompanzasyonların da yakınsama problemlerine neden olabildikleri bilinmektedir [3].

Bu çalışmada, özellikle, sistem yükünün artmasından doğan problemler incelenmektedir. İki baralı sistemde bilinen P-V eğrilerinde kritik noktaya yaklaşılmaması halinde, bu nokta civarındaki teğetlerin eğimlerinin (türevler) arttığı ve Jakobiyen matrisin bütün türevleri içerdiği göz önüne alınır, Newton-Raphson metodunu bazı önlemler alınmadan kullanmak, metodun ya iraksama ya da alt bölgedeki düşük gerilim değerine yakınsamasına neden olabilecektir. [3].

Bu nedenle, yöntemin kararlılığını arttırmak amacıyla matris parçalaması teknikleri uygulanabilir. Bu çalışmada ise, doğal kararlı yapısı nedeniyle yük akışı analizleri Decoupled M'todu' na dayalı olarak yapılmıştır.

### 3. İNDİRGENMİŞ KUZEY BATI ANADOLU (KBA) ENERJİ SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

1997 yılı istatistiklerine göre, Ülkemizin elektrik enerjisi üretimi açısından kurulu gücü 21.164 MW olup. Bu gücün yaklaşık olarak 6.000 - 7.000 MW i sanayinin çok yoğun olduğu ve nüfusun büyük kesiminin yaşadığı Marmara ve Trakya bölgesinde tüketilmektedir. Bu sebepten ulusal şebekenin önemli dağıtım bölümleri bu bölgedeki Kuzey Batı Anadolu (KBA) şebekesi ile gerçekleştirilmektedir. 1997 yılı verilerine göre, kurulu gücün % 47'si hidrolik santrallerle üretilmesi ve bu üretim merkezlerinin çoğunun, ülkemizin coğrafi yapısı nedeniyle doğu bölgesinde bulunması, tüketimin büyük bir bölümünün batı bölgelerinde gerçekleşmesi, ulusal ağ şebekemizin planlanması, işletilmesi ve kontrolü büyük önem arz etmektedir [5].

Bu sebeplerden dolayı, ulusal şebekenin önemli iletim ve dağıtım bölümlerinden olan KBA şebekesinin TEAŞ' dan alınan verilerine dayanarak kısmen indirgenmiş modeliyle bu tezde çalışma yapılmış ve sistem üzerinde gerilim kararlılığının incelemeleri yapılmıştır.

Önce, indirgenmiş KBA şebekesinin gerilim ve güç profili çıkarılıp, bara admitans matrisi elde edilir. Admitans matrisi ( $Y_{\text{bara}}$ ) ile elde edilen lineer jakobiyen matrisin sistemin bozucu etkiye maruz kalması halindeki davranış matrisin öz değerleri ile incelenecektir.

Buna göre herhangi bir yük durumu için yük akışı yapılıp, salınım barası ve gerilim kararlılığı açısından incelenilen baranın dışındaki tüm baraların tüm güçleri eşdeğer admitansa çevrilmiş, tüm yük sabit tutularak sadece ilgilenilen barada her adımda yük arttırılarak yük akışı iraksayana kadar kritik değerlerin hesaplanmasına devam edilmiştir ve kritik noktaya ulaşılmıştır. Newton-Rapson metodundaki jakobiyen matris bütün türevleri içerdiğinden, kritik noktaya yaklaşılmaması halinde, bu noktadaki teğetlerin (türevler) eğimleri arttığı göz önüne alınır, metodun ya iraksama ya da alt bölgedeki düşük gerilim değerine yakınsaması olacağından, nümerik kararlılığı arttırmak için Decoupled metoduna dayalı yük akışları yapılmıştır.

Gerilim kararlılığını etkileyen en önemli etkenlerin başında yük artışlar, gelmektedir. Ülkemizdeki yıllık enerji talebi artışı % 10 düzeyinde olduğu göz önüne alınarak [1], incelenen KBA sisteminin 10 yıllık bir periyot içinde mevcut sistem üzerinde yük artışlarındaki, gerilim kararlılığı incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken mevcut sistem korunmuş yani sistemde hiçbir iyileştirme ( yeni iletim hattı, yeni üretim baraları, vb.) yapılmadığı kabul edilmiştir.

#### 3.1 İndirgenmiş Kuzey Batı Anadolu Sistemi

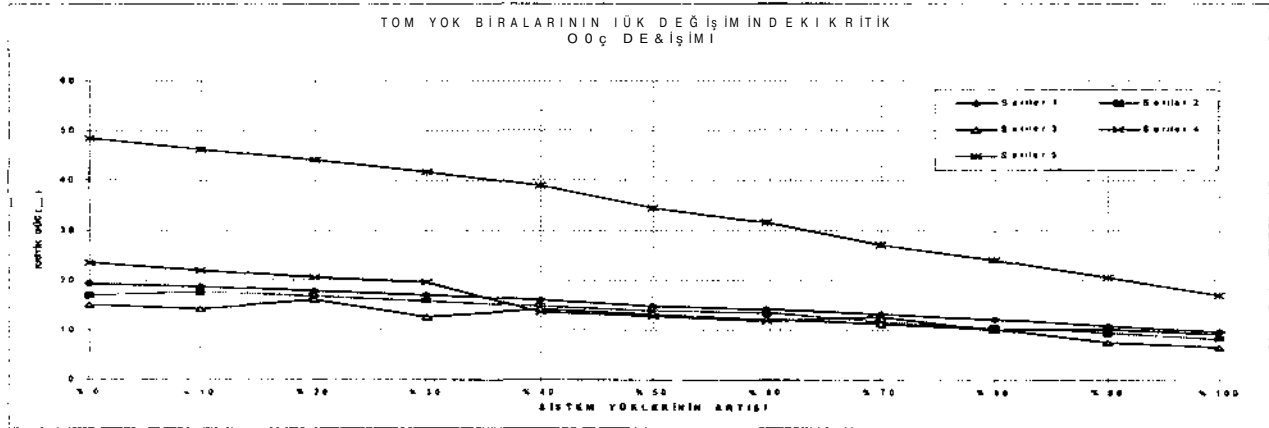
Kuzey Batı Anadolu (KBA) enerji dağıtım şebekesi, enerji talebinin en yoğun olduğu ve ulusal ağ şebekesinin önemli bölümlerinden olan Marmara-Trakya bölgesinde yer almaktadır. Çok-baralı sisteme örnek teşkil eden, KBA şebekesi, TEAŞ' dan alınan veriler yardımıyla kısmen indirgenmiş ve bu sistemi teşkil eden 5'i üretim (generatör) olmak üzere, 10 baralı ve 11 elemanlı Şekil 1' deki bir sisteme çevrilmiştir [5].

arasında azalma olduğu görülmektedir. Sadece 1 ve 5 nolu haralarda tüm yük ve üretim artışları boyunca bir düşüş olmamakta, mevcut değerlerinin koruyabilmektedirler. Bu kritik güç değerlerinin düşüş ve artış oranlarını, hattın özelliği, yükün büyüklüğü, yük harasının üretim harasına yakınlığı, şönt ve seri kompanzasyon değerleri gibi faktörler etkilemektedir. Yıllık % 10' luk yük ve üretim artışlarındaki, tüm yük baralarındaki kritik güç değişimlerinin aynı anda görülebilmesi için Şekil 2' teki grafiği oluşturulmuş. Aynı şekilde gene yük ve üretim artışlarındaki, kritik gerilim değişimlerini tüm yük haralarında görebilmemiz için şekil 3 oluşturulmuştur

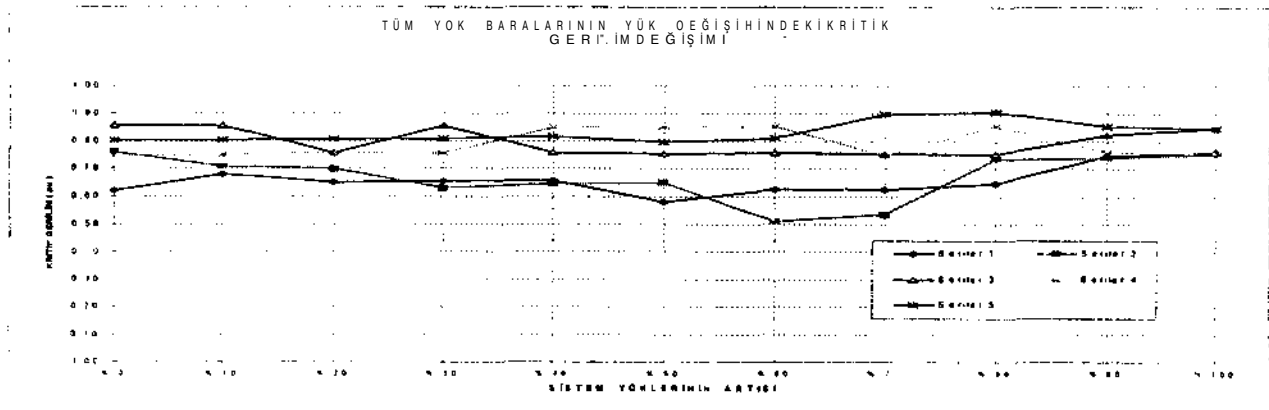
Mevcut sistemde hiçbir iyileştirme yapılmadan mevcut sistem yükünün %10' luk bir artış yüzdesiyle periyodik olarak arttırılmasıyla sistemin yük haralarının kritik güçleri (P<sub>crit</sub>) düşmekte, buna karşın yük haralarının kritik gerilim (V<sub>crit</sub>) değerleri çok az değişerek artmaktadır

## 6. KAYNAKÇA

- [1] ATABEK, H., "Enerji İletim Sistemlerinde Yük Artışlarının Gerilim Kararlılığınma Etkileri", Y.Lisans Tezi, SAÜ. F.B.E , Adapazarı, 1998
- [2] IEEE, "Special Publication 90<sup>TM</sup>0358-2-PWR", "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical tools, and Industry Experience, 1990



Şekil 2. Yük baralarındaki güç artışlarına karşılık kritik güç değerlerinin değişimleri



Şekil 3. Yük baralarındaki güç artışlarına karşılık kritik gerilim değerlerinin değişimleri

## 5.SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuç; sistemdeki belli orandaki yük artışlarının meydana getireceği kritik güç düşüşlerinin, sistemdeki üretim baralarında aynı oranda arttırılması) la kritik değerler üzerinde bir iyileşmenin sağlanamadığıdır

- [3] YALÇIN, M.A., "Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi", Doktora Tezi, İTÜ, E-E Fakültesi, İstanbul, 1995

- [4] CIGRE Task Force 38-02-03, "Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena", 1993

- [5] YIGİT GÜDEN, "Göreve Başlık", TEAŞ, Türkiye Elektrik Üretim İletim Yayın Organı , Sayı 6, S.6-7, Ankara, 1997

# UME GERİLİM LABORATUVARI VE TÜRKİYE'DE GERİLİM BİRİMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Özlem YILMAZ, Okan YILMAZ, Saliha SELÇİK

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarı  
PK:21 41470 Gebze/KOCAELİ  
E-mail: ozlem.yilmaz@ume.tubitak.gov.tr

## ABSTRACT

*The Voltage Laboratory of UME (National Metrology Institute of TURKEY) is responsible for the establishment and maintenance of the national standards for voltage and current measurements and dissemination of the units by means of calibrations. The laboratory is also responsible to prove the accuracy of the national standards by participating international comparison measurements. It provides a wide range of calibrations such as DC voltage references, thermal transfer standards, AC/DC current shunts, calibrators, multimeters and resistive dividers.*

*in common with other national metrology institutes, the realization of the unit of voltage is based on AC Josephson effect at UME. The traceability for DC current measurements is established using DC voltage and resistance standards. The current shunts are used as reference for this calibrations.*

*For AC voltage measurements, AC/DC transfer standards are used to establish the traceability to the basic DC standards. Calibrations of customers' transfer standards are performed by computer controlled system developed at UME. The AC/DC transfer standards together with the AC/DC current shunts also form the basis for AC current transfer measurements.*

*As a part of international cooperation and equivalence of standards, the laboratory has been participated in several intercomparisons. The results show good agreements with the international standards.*

## 1. GİRİŞ

Bugün toplumun hemen her kesiminin sahip olmayı olağan saydığı telefondan televizyona, ütüden buzdolabına kadar çeşitli elektrikli ürünlerin ekonomik olabilmelerini sağlayan seri üretim, bu ürünleri oluşturan her parçanın hassas olarak aynı karakterde yapılabilmesinin sonucudur. Bunun yanısıra giderek artan uluslararası işbölümü, bir ürünü oluşturan parçaların değişik ülkelerde üretilip daha sonra birleştirilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Dolayısıyla, ürün kontrolü için ölçülen parametrelerin benzer koşullarda aynı sonuçları vermesi gerekmektedir. Elektriksel büyüklüklerden gerilim ve akım da üretim sistemlerinde ölçülmesi gereken önemli parametrelerdendir.

Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarı ülke içinde gerçekleştirilen gerilim ve akım ölçümlerinin uluslararası metroloji sistemine entegrasyonunu sağlamak amacıyla, ulusal "volt" birimini gerçekleştirmek, muhafaza etmek, uluslararası karşılaştırma ölçümleri ile doğruluk seviyesinin uluslararası alanda tanınmasını sağlamak, gerilim ve üzerinden türetilen akım doğruluğunun kalibrasyon hizmeti yoluyla ülke içinde ikinci ve daha alt seviyedeki laboratuvarlara aktarılması ile görevlidir. Aynı zamanda, ülke gereksinimlerini dikkate alarak yeni ölçüm sistemlerinin kurulması, uygun ölçüm metodlarının oluşturulması, laboratuvarlar arasında izlenebilirliğin taşınmasında kullanılan standartların tasarımı ve yapımı laboratuvarın faaliyetleri arasındadır.

## 2. UME GERİLİM LABORATUVARI

UME Gerilim Laboratuvarı'nda DC gerilim, AC gerilim, DC akım ve AC akım ölçümleri gerçekleştirilmektedir. DC gerilim izlenebilirliği birincil seviyedeki 10 Volt Josephson Gerilim Standardı üzerinden sağlanırken, DC akım ölçümlerinin izlenebilirliği, DC akım şöntleri kullanılarak, DC gerilim ve DC direnç standartları üzerinden elde edilmektedir. AC/DC transfer standartları, AC ölçümlerinin temel DC standartlara izlenebilirliğini sağlamak için kullanılmaktadır. Bu standartlar, AC/DC akım şöntleri ile birlikte, AC akım transfer ölçümleri için de temel oluştururlar.

UME Gerilim Laboratuvarı, yakın gelecekte ortaya çıkabilecek endüstrinin potansiyel ihtiyaçlarını dikkate alarak, bu ihtiyaçların karşılanması doğrultusunda laboratuvar alt yapısını ve ölçüm olanaklarını genişletme ve iyileştirme çalışmalarını sürdürmektedir. Bu doğrultuda, Josephson Gerilim Standardının iyileştirilmesi ve otomasyonu, çoklu eklem ısı çeviriciler kullanılarak birincil seviye AC/DC standart sisteminin oluşturulması. AC gerilim ölçümlerinde frekans üst limitinin 1 MHz'den 1 GHz'e yükseltilmesi ve 400 kV'a kadar AC, DC ve darbe gerilim ölçümlerini gerçekleştirecek yüksek enerjili laboratuvarının kurulması yönündeki çalışmalar devam etmektedir.

## 2.1 UME Gerilim Laboratuvarı Kalibrasyon İmkanları

UME Gerilim Laboratuvarı, oldukça geniş bir yelpazede, çeşitli akım ve gerilim kaynakları ve ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarını gerçekleştirmektedir. Laboratuvarın mevcut standart ve teçhizatı ile DC gerilim standartları (1 V, 1.018 V, 10 V), DC gerilim bölücü, kalibratör, multimetre, voltmetre, ampermetre, AC/DC akım şöntü, AC/DC transfer standardı, yüksek gerilim kaynağı, yüksek gerilim probu ve osiloskop (< 600 MHz) kalibrasyonları yapılabilmektedir.

Ulusal "volt" doğruluğu kesintisiz bir kalibrasyon zinciriyle, endüstriden gelen cihazlara aktarılır. DC gerilim ölçümleri Laboratuvar'da, 10 V'a kadar  $10^{-9}$  belirsizlikle gerçekleştirilirken, 1000 V'a kadar gerçekleştirilen ölçümlerde belirsizlik aralığı  $10^{-6}$ 'dır. Laboratuvar aynı zamanda yüksek gerilim ölçümlerinde 35 kV'a kadar kalibrasyon hizmeti vermektedir.

DC akım ölçümlerinin izlenebilirliği, DC akım şöntleri kullanılarak DC gerilim ve DC direnç standartları üzerinden sağlanmaktadır. Laboratuvar'da, 1µA-300A aralığındaki DC akım ölçümleri DC akım şöntü kullanılarak, 300A-1000A aralığındaki DC akım ölçümleri ise, akım bobini kullanılmak suretiyle gerçekleştirilebilmektedir.

AC ölçümlerinin temel DC standartlara izlenebilirliği, AC/DC transfer standardı veya ısıl transfer çevirici olarak adlandırılan arabirimler kullanılarak sağlanmaktadır. [1]. Müşteriye ait AC/DC transfer standartlarının kalibrasyonu, Laboratuvar'da geliştirilen bilgisayar kontrollü kalibrasyon sistemi kullanılarak 10 Hz-1 MHz frekans bölgesinde 10 mV-1000 V aralığında gerçekleştirilmektedir. Referans gerilim probu ile gerçekleştirilen AC yüksek gerilim ölçümleri ise 20 kV'a kadar 10 Hz-1 kHz frekans aralığında yapılabilmektedir.

AC akım ölçümleri 5 mA-20 A (10 Hz-100 kHz) aralığında AC/DC transfer standardı/akım şöntü sistemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. 20 A-1000 A (10 Hz-440 Hz) aralığındaki AC akım ölçümleri ise, akım bobini kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

## 2.2 Yer Alınan Uluslararası Karşılaştırma Ölçümleri

Uluslararası i;birliğin bir parçası olarak ve mevcut standartların doğruluğunun uluslararası alanda teyidi amacıyla, UME Gerilim Laboratuvarı, uluslararası karşılaştırmalarda yer almaktadır. Bu çerçevede, Fransa'nın ulusal metroloji enstitüsü BNM/LCIE (Bureau National de Métrologie-Laboratoire Central des Industries Electriques)'e ait Josephson Gerilim Standardı ile UME 10V Josephson Gerilim Standardı karşılaştırılmış AC ölçümlerde ise, NIST ile Alman metroloji enstitüsü-PTB (Physikalisch-technische Bundesanstalt)'e ait AC DC transfer standartları 10mV-100V (10Hz-1MHz) aralığında karşılaştırılmaktadır. Aynı zamanda, PTB'nin önderliğinde gerçekleştirilen ve 5 ülkenin yer aldığı genel elektriksel büyüklüklerin (DCV, ACV, DCI, ACI ve R) karşılaştırılması presesinde de yer almıştır.

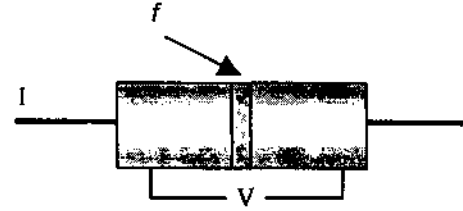
Karşılaştırma ölçüm sonuçları, gerçekleştirilen ölçümlerin belirtilen belirsizlik değerleri içinde olduğunu göstermektedir. Uluslararası konferanslarda sunulan ve bildiri olarak yayımlanan ölçüm sonuçları [2, 3] son derece tatmin edici olup, Türkiye'de gerçekleştirilen elektriksel ölçümlerin uluslararası standartlara entegrasyonunu belgelemektedir.

## 3.GERİLİM BİRİMİ "VOLT"UN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Teorisi 1960 yılında Dr. Brian Josephson tarafından oluşturulmuş olan AC Josephson etkisi [4], günümüzde birçok metroloji enstitüsünde gerilim birimi olan Volt'un gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. Josephson gerilim standardı, 1990 yılında birincil seviye gerilim standardı olarak uluslararası alanda kabul görmüş olup, 1997 yılından itibaren UME Gerilim Laboratuvarı'nda Volt'un gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır.

Josephson gerilim standardı, frekans doğruluğunu DC gerilime aktaran bir sistemdir. Bilindiği üzere, metrolojide en yüksek doğrulukta ölçülebilen birim frekans birimi olup, sezyum atomik saati ile  $10^{-14}$  doğruluk derecesinde elde edilebilmektedir. Buna bağlı olarak, gerilimi doğrudan frekans ile ilişkilendiren Josephson eklemi ile çok kararlı ve tekrarlanabilir DC gerilim  $10^{-9}$  doğruluk derecesinde elde edilebilmektedir.

Josephson eklemi, ince yalıtkan bir oksit tabakasıyla ayrılmış iki süperiletken malzemenin zayıfca bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır.



Sekili. Josephson eklemi

Bu eklem ideal bir frekans-gerilim dönüştürücüsüdür. Eklem üzerinde, kritik akım ( $I_c$ ) olarak adlandırılan maksimum bir değere kadar bir DC süperakım, hiçbir gerilim düşümü olmaksızın geçebilmektedir. Bu akımı oluşturan etki, eklemdeki iki süperiletken arasındaki faz farkıdır. Bu etki DC Josephson Etkisi olarak adlandırılmış olup aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir;

$$I = I_c \sin \phi \quad (D)$$

Formülde I süperakım,  $I_c$  eklem kritik akımı,  $\phi$  ise süperiletkenler arasındaki faz farkıdır.

Ekleme DC gerilim uygulandığı durumda, faz farkının zamanla değişimi nedeniyle, eklem üzerinde gerilim ile doğrudan ilişkili bir de AC süper akım oluşacaktır. Bu etki AC Josephson Etkisi olarak adlandırılır. Dr. B. Josephson, faz farkı değişimi ile DC gerilim arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak şu şekilde ifade etmiştir;

$$V = \frac{h}{4\pi e} \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Formüle,  $e$  elektron yükü,  $h$  Planck sabiti,  $V$  eklem üzerindeki DC gerilim,  $\phi$  ise faz farkıdır. Eklem üzerinden akan süperakım en genel ifadesiyle, formül 2'in entegralini alarak formül 1'de yerine koymak suretiyle;

$$I = I_C \sin\left(\frac{4\pi e}{h} Vt + \phi_0\right) \quad (3)$$

olarak ifade edilmektedir. Formül 3'den de görüleceği gibi, AC süperakım frekansı ve eklemeye uygulanan DC gerilim arasındaki bu ilişki,

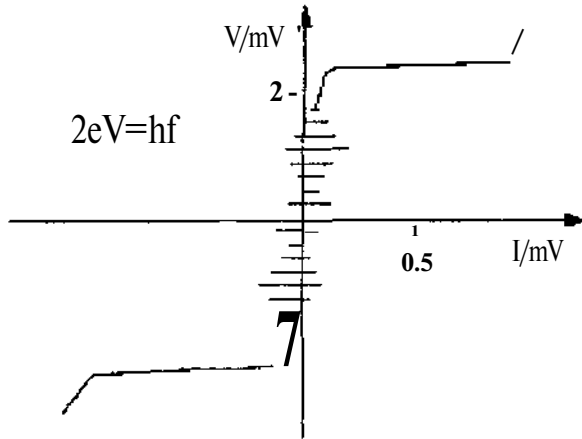
$$f = \frac{2e}{h} V \quad (4)$$

olarak ifade edilir.

Eklemeye,  $f_c$  frekansında bir mikrodalga uygulandığı durumda, Josephson eklem osilasyonu, uygulanan frekansa ve harmoniklerine kilitlenme yönünde eğilim gösterir. Bu durumda eklem üzerindeki gerilim, uygulanan frekansa bağlı olarak;

$$V = n \frac{h}{2e} f_c \quad n=1,2,3.. \quad (5)$$

şeklinde olup, eklemden frekans ve  $n$ 'ye bağlı olarak çeşitli gerilim adımlarının elde edilmesi mümkündür. Eklem gerilim-akım eğrisi çizildiğinde, akım genişliği uygulanan AC gerilimin büyüklüğüne bağlı bir "sabit gerilim adımı" gözlenmektedir. (Şekil 2). Oluşan bu sabit gerilim adımları ilk defa Shapiro tarafından gözlenmiş olduğundan, Shapiro Adımları olarak adlandırılmaktadırlar.



Şekil 2. Shapiro adımları

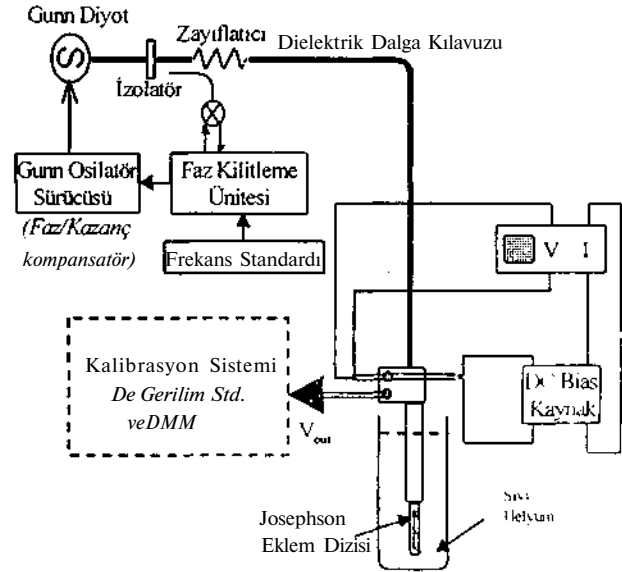
Josephson sabiti ( $K_J$ ) olarak adlandırılan  $h/2e$  oranının değeri, metroloji hiyerarşisinin en üst noktasında yer alan organizasyon (Comité International des Poids et Mesures-CIPM) tarafından 483 597,9 GHz/V olarak kabul edilmiştir. Bu şekilde, Josephson gerilim doğruluğunun, sadece uygulanan frekansın doğruluğuna bağlı kalması

sağlanmıştır. Formül 5'den de görüldüğü gibi, Josephson gerilimi, Josephson eklem tipinden, eklem geometrisinden, kullanılan materyallerden, manyetik alandan ve uygulanan frekansın gücünden bağımsızdır.

Tek bir Josephson eklemi üzerinden elde edilebilecek gerilim değeri mV'lar mertebesindedir. Daha yüksek gerilim değerleri, çok sayıda Josephson ekleminden seri olarak bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir. UME Josephson Gerilim Standardı'nın temelini oluşturan Josephson eklem dizisi, Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb teknolojisi kullanılarak üretilmiş olan yaklaşık 20000 adet Josephson ekleminden seri bağlanması suretiyle PTB tarafından üretilmiştir. Bu sayede UME Josephson Gerilim Standardı ile -10V ile +10V aralığında yüksek doğrulukta gerilim adımları elde edilebilmektedir.

### 3.1 UME 10V Josephson Gerilim Standardı

Josephson Gerilim Standardı, Josephson eklem dizisi, dizinin monte edildiği prob, diziyeye 75 GHz'de güç uygulayan Gunn osilatör, 10 MHz Rb frekans standardı, faz kilitleme modülü, Josephson gerilimi ve kalibre edilen referans arasındaki gerilim farkını ölçen bir voltmetre, n-Josephson gerilim adım sayısını belirleyen DC akım kaynağı ve çalışma noktasını gözlemlemek için kullanılan bir osiloskoptan oluşmaktadır [5]. Şekil 3'de başlıca elemanları içeren UME 10 Volt Josephson Gerilim Standardı'nın şeması gösterilmiştir.



Şekil 3. UME Josephson Gerilim Standardı

Faz kilitleme modülü, 5 GHz mikrodalga referansını, 10 MHz Rubidyum referansına kilitleyerek sistemin referansını oluşturur. Gunn osilatörün mikrodalga referansın 15. harmoniği ile 10 MHz farkına kilitlenmesi suretiyle oluşan 74.99 GHz değerindeki frekans 1V'ile, 10V Josephson Gerilim Standardı'nın çalışma frekansıdır. Bu faz kilitleme sistemi ile, 7-1.99 GHz frekansının doğruluğu, Rubidyum referansının doğruluğuna eşittir ( $0.5 \times 10^{-11}$ ).

Josephson Gerilim Standardı ile ikincil seviyedeki zener diyot yapıları DC gerilim standartlarının kalibrasyonu gerçekleştirilmektedir. Kalibrasyon, Josephson gerilimi ve kalibre edilecek referansın gerilim değerlerinin karşılaştırılması suretiyle yapılmaktadır. Bunun için Josephson dizisi ve kalibre edilecek standart ters polaritede seri bağlanarak, aralarındaki gerilim farkı, giriş empedansı yüksek bir voltmetre ile ölçülür. Pratikte, yapılan her gerilim ölçümünde termal emf ve voltmetre ofset hataları mevcuttur. Bu hataların ortadan kaldırılması amacıyla, ölçümler iki polaritede gerçekleştirilerek hesaplamalarda bu ölçümlerin ortalama değerleri kullanılır.

Josephson Gerilim Standardı ile gerçekleştirilen ölçümlerde belirsizlik büyük oranda kalibre edilen DC gerilim standardının ve voltmetrenin kısa dönem kararsızlığından kaynaklanmakta olup bu belirsizlik genel belirsizlik bütçesinde A tipi belirsizlik olarak yer almaktadır. Sistemdeki sistematik hatalar ise, frekans belirsizliği, voltmetrenin kazanç hatası ve kaçak akımlardan kaynaklanmaktadır. Ancak B tipi belirsizlik olarak adlandırılan bu sistematik hatalar A tipine göre oldukça düşük değerdedir. 10 Volt ölçümlerindeki B tipi belirsizlik bileşenleri %66 güvenilirlik seviyesinde Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Belirsizlik kaynakları ve belirsizlik değerleri.

B Tipi Belirsizlik Bileşenleri	
Kaçak Akım	$0.2 \times 10^{-9}$
Voltmetre	$0.2 \times 10^{-9}$
Frekans	$0.05 \times 10^{-9}$
<b>B Tipi Belirsizlik</b>	<b><math>0.3 \times 10^{-9}</math></b>

#### 4. SONUÇLAR

Ulusal "volt" birimini gerçekleştirmek, ulusal standartların doğruluk seviyelerinin uluslararası alanda tanınmasını sağlamak, gerilim ve akım doğruluğunu kalibrasyon hizmeti yoluyla ülke içinde alt seviyedeki laboratuvarlara aktarmakla görevli olan UML Gerilim Laboratuvarı, çalışmalarını bu paralelde sürdürmektedir. Laboratuvar sahip olduğu bilgi ve teknolojiyi, kalibrasyon hizmeti, eğitim, seminer ve yayınlar yolu ile, ülke endüstrisinin hizmetine sunmaktadır. Gerçekleştirilen tüm kalibrasyonlar ulusal standartlara dolayısıyla uluslararası izlenebilirliğe sahiptir.

Gerilim Laboratuvarı, oldukça geniş bir yelpazede, çeşitli akım ve gerilim kaynakları ve ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarını gerçekleştirmektedir. Laboratuvar, yakın gelecekte ortaya çıkabilecek endüstrinin potansiyel ihtiyaçlarına dikkate alınarak da bu ihtiyaçların karşılanması için laboratuvar alt yapılarını ve ölçüm yöntemlerini geliştirme ve iyileştirme çalışmalarını sürdürmektedir.

Laboratuvar'da gerilim birimi olan  $10^{-9}$  V Josephson Eklem Dizisi Gerilim Standardı kullanılarak, uluslararası

alanda birincil seviyede,  $10^{-9}$  V mertebesindeki belirsizlikle gerçekleştirilmektedir. Ulusal volt doğruluğu, kalibrasyon yoluyla endüstride kullanılan standartlara ve cihazlara aktarılmaktadır.

#### KAYNAKÇA

- [1] Selçik, S., "AC gerilim standartları ve AC gerilim izlenebilirliğinin sağlanması", 1. Ulusal Ölçümler Kongresi Bildirileri, sf. 1-7, 1995
- [2] Özgül, Ş., Selçik, S., Klönz, M., "The automated AC-DC Transfer Calibration System at UME and intercomparison with PTB", IMEKO-XV World Congress Digest, 1999
- [3] Eckardt, H., Schliestedt, G., Scholimeier, W., "Internationaler vergleich elektrischer grössen", PTB-Mitteilungen 1, 1998
- [4] Josephson, B. D., "Possible new effects in superconductive tunnelling", *Physics Letters*, vol. 1, no. 7, pp. 251-253, 1962
- [5] Selçik, S., Akyel, B., Gutmann, P., "The 10 Volt Fixed Frequency Josephson Voltage Standard at UME-Ulusal Metroloji Enstitüsü", CPEM Digest, pp. 556-557, 1998



# 3-FAZLI ALÇAK GERİLİM DAĞITIM SİSTEMLERİNDE NÖTR YÜKLENMESİNDEN KAYNAKLANAN PROBLEMLERİN İNCELENMESİ

Ekrem GÜRİSOY, Ömer GÜL, Adnan KAYPMUZ

İstanbul Teknik Üniversitesi  
Elektrik ve Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü  
80626 Maslak İstanbul  
E-mail:{gursoy, gul, kaypmuz}@elk.itu.edu.tr

## ABSTRACT

*As a result of increase in non-linear loads, voltage and current waveforms are becoming more distorted on building distribution systems. Whenever three phase four wire systems are used to supply power to computer system, office equipment and other similar electronic loads, the power system should allow for the possibility of high harmonic neutral currents. This paper introduces neutral currents for different loading conditions in a four-wire electrical distribution system, high neutral current related problems and also take consideration on neutral-ground voltage which is important for sensitive electronic devices.*

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerji sistemlerinde kullanılan lineer olmayan yükler sistemin gerilim ve akımının dalga şeklinde bozulmalara neden olmaktadır. Enerji sistemlerindeki harmonik kaynaklar, harmoniklerin etkileri ve elimine edilmeleri konularında yapılacak çalışmaların daha verimli olması için sistemin gruplara ayrılarak incelenmesi gerekir. Bu sınıflama elektrik enerjisinin iletim ve dağıtım tesisleri, endüstri tesisleri, konutlar ve ticari binalar olarak yapılabilir [1,2].

Günümüzde bina yüklerinin büyük bir bölümünü anahtarlamalı güç kaynakları, elektronik ve manyetik balastlar, UPS sistemleri, ayarlı hız sürücüler tarafından beslenen cihazlar oluşturmaktadır. Bu yüklerin kullanıldığı binaların elektrik dağıtım sistemlerinde, harmoniklerden kaynaklanan problemler gittikçe artmaktadır. Bu yükler, beslendikleri faz hatlarından büyük harmonik akımlar çektikleri gibi, özellikle, nötr hattından da büyük akımların geçmesine sebep olmaktadır. Yüksek harmonik akımlar, hatlarda ısınma, güç faktöründe azalma, yapılan ölçümlerde hata ve cihaz ömründe kısalma gibi problemlere yol açmaktadır [3-5].

Güvenlik nedeniyle yapılan topraklama, sistem için, minimum bir gerekliliktir. Sistemin gürültü performansını artırmak için alınacak diğer önlemler, güvenlik topraklamasına ek olarak yapılmalıdır. Farklı topraklama bölgeleri arasındaki potansiyel farkı; yalıtımı zorlamakta, düşük gerilimli kablolarda dolaşan toprak akımlarına neden olmakta ve mikrobilgisayar, programlanabilir kontrolör gibi hassas elektronik cihazları etkilemektedir [6].

## 2. 3 FAZLI 4 İLETKENLİ SİSTEMLERDE NÖTR AKIMINDAN KAYNAKLANAN PROBLEMLER

3 fazlı 4 iletkenli enerji sistemlerinde nötr akımı, üç faz akımının vektörel toplamıdır. Birbirinden 120 derece faz farklı ve sinüs biçimindeki 3 fazlı dengeli lineer akımların toplamı her an sıfırdır ve bu yüzden bir nötr akımı oluşmaz. Tek fazlı yükleri besleyen sistemde genellikle faz akımlar dengeli olmadığından, nötrden bir akım geçmektedir. Dengesiz yüklerden kaynaklanan bu küçük nötr akımlar enerji dağıtım sistemlerinde fazla sorun yaratmaz. Üç faza dengeli bir şekilde dağıtılmış tek fazlı yük durumlarında dahi ciddi nötr akımları oluşabilmektedir. Doğrultucu ve anahtarlamalı güç kaynakları gibi lineer olmayan yükler, kaynaktan, sinüsoidal olmayan akımlar çekerler. Bu nedenle 3 fazlı sinüsoidal olmayan dengeli akımların vektörel toplamı sıfır olmayabilir. Örneğin üç fazlı devrelerde, frekansı temel frekansın üç ve üçün katı olan ve 120 derece aralıkla bulunan harmonikler aynı fazda olduğundan nötr iletkeninde birbirine eklenir ve bunların toplamı sıfır değildir. [6-7],

Modern ofis cihazlarında, aydınlatma sistemlerinde ve diğer küçük güçlü elektronik cihazlarda kullanılan anahtarlamalı güç kaynakları sıfır bileşen harmonik (üç ve üçün katı olan harmonikler) akımlarına neden olurlar. Güç sistemlerinde büyük nötr akımlar, transformatörlerde ve besleme hatlarında aşırı yüklenmelere ve gerilim bozulmasına neden olurlar [7-10].

3 fazlı 4 iletkenli bina besleme hatlarında faz ve nötr iletkenleri genellikle akım taşıma kapasitelerine göre boyutlandırılır. Nötr iletkeninden harmonik akımlar geçtiğinde ilave bir ısınma oluşur ve yüklenme kapasitesi düşer. Bazı durumlarda nötr akımı, faz akımını aşabileceğinden, nötr hattı aşırı yüklenir. Nötrde harmonik akımlar oluşturan güç kaynakları yüksek, efektif-tepe değerli bir akım dalga şekline sahip olduğundan gerilim dalga şekli de bozulabilir. Ayrıca bu güç kaynakları devresindeki kondansatörü dolu tutmak için sinüs dalgalarının tepe değerini kullandıklarından gerilimin efektif değeri aynı kalsa bile, tepe değerindeki azalma güç kaynağının girişinde düşük bir gerilim olarak gözükür. Dalga şeklindeki bozulma aynı kaynaktan beslenen motorların ve manyetik elemanların daha fazla ısınmasına neden olur [10,11].

3 fazlı güç sistemlerinde gürültü (comon mode noise -CMN-) nün bir şekli de cihazın nötrü ile toprak arasındaki gerilim farkıdır. Büyük harmonik nötr akımları, nötr iletkenin harmonik frekanslarındaki empedansında ciddi gerilim düşümleri meydana getirir. Nötr iletkenindeki gerilim düşümü bilgisayar sistemlerinde CMN olarak gözüktür. Düşük frekanslı CMN geriliminin bilgisayar sistemlerine etkisi önemli olmakla birlikte, bilgisayar sistemlerinde, nötr-toprak gerilimi frekanstan bağımsız olarak, 3 V<sup>TM</sup> değerinden küçük olmalıdır[6].

Dengeli üç ve üçün katı harmonik akımlarının etkisi üçgen-yıldız bağlı transformatör kullanılarak, nötr hattında yok edilebilir. Bu durumda dengeli üç ve üçün katı harmonik akımları transformatörün üçgen bağlı primer sargılarında dolanırlar. Sonuç olarak primer sargıda daha fazla akım aktığından transformatörün ısınmasına ve aşın yüklenmesine neden olurlar. Joule kayıpları, manyetik, deri (skin effect) ve yakınlık (proximity effect) etkilerini içerip yük akımına bağlı olarak iletkenin ısınmasına neden olur. Homojen, silindirik bir iletkende sabit temel iletkenlik, düzgün yüzey sıcaklığı ve düzgün akım dağılımı durumunda joule kaybı nedeniyle oluşan ısınma! 11]

$$P_{pk} \cdot I^2 \cdot R_{dc} \cdot (1 - K_{xo} \cdot T) \quad (1)$$

olarak verilir. Burada I akımın efektif değeri, R<sub>dc</sub> 0°C de birim uzunluk için de direnç, cc<sub>0</sub> direncin 0°C ve T arasındaki sıcaklık katsayısı, T iletkenin iletimde bulunan kısmının ortalama sıcaklığı, ke çarpanı ise direncin den ve yakınlık etkilerine bağlı olarak artışını belirtir. Frekanstan kaynaklanan etkiler göz önüne alınarak ac direncinin de direncine oranı, ke, şu şekilde verilmektedir! 11].

$$k_e = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + k_{se} + k_{pe} \quad (2)$$

Burada, ke deri etkisine bağlı direnç artışını ve k<sub>pe</sub> ise yakınlık etkisine bağlı direnç artışını göstermektedir. Akımdaki toplam harmonik bozulma:

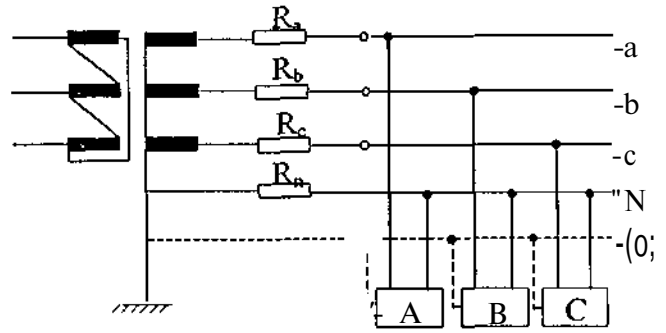
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (3)$$

$$I = I_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \quad (4)$$

4. denklemden görüldüğü gibi harmoniklerin olmadığı durumda toplam akımın efektif değeri, temel bileşen akımının değere eşit olmaktadır.

### 3. ÇEŞİTLİ YÜK DURUMLARINDA NÖTR İLETKENİ İNCELEMESİ

Burada, alçak gerilim dağıtım sisteminde, nötr iletkeninde meydana gelen problemler ^eki! 1 de verilen örnek hır model üzerinde incelenmiştir. Bu örnek gerçek sisteme uygun ^ekille modellenmiş olup, akım ve gerilim değerleri gerçek değerlerle uygunluk göstermektedir. Seçilen iletken kesitleri ^taiki.rJa/a uygundur. Yüklerin saf sinüsoidal gerilimle beslendiği düşünülmüş, transformatörde doyma etkisi ihmal edilmiştir. Ayrıca harmoniklerin hat dirençlerini değiştirmediği ^ie kabı!



Şekil 1. 3-faz 4 iletkenli dağıtım sistemi

Ra, Rb, Rc faz iletkeni dirençleri; R<sub>n</sub> nötr iletkeni direnci

Tablo 1: Dengeli ve harmonikli durum için hesaplanan akım ve gerilim değerleri

	I	II	III
ila (A)	100	100	100
Iib(A)	100	100	100
Iic(A)	100	10ü	100
I3. (A)	0	15	0
I3b (A)	0	15	0
I3c (A)	0	15	0
I5a (A)	0	0	15
I5b(A)	0	0	15
I5c (A)	0	0	15
la (A)	100	101.12	101.12
Ih (A)	100	101.12	101.12
Ic (A)	100	101.12	101.12
I in (A)	0	0	0
hn (A)	0	45	0
I5n (A)	0	0	0
in (A)	0	45	0
VnT (V)	0	11.28	0
Vfra (V)	218.5	218.8	218.507
Vbn2 (V)	218.5	218.8	218.507
V2-nc (V)	218.5	218.8	218.507
VnT (V)	0	5.175	0
Vta2 (V)	218.5	218.6	218.507
Vfth (V)	218.5	218.6	218.507
V2-nc (V)	218.5	218.6	218.507

edilm^Ur Bilgisayarda modellenen sistemde, yüklerin dengeli, dengesi/, harmonikli ve dengersiz harmonikli olması durumları için fa/ ve nötre ait temel ve harmonik bileşen akımları verilmiştir Burada harmonikli bir sistemde olabilecek doğru t ileşen {1,4,7...}, ters bileşen (2,5,8...) ve sıfır bileşen (03 6"> ) akımlarından herbirinden bir örnek alınmıştır. Bu 1 .j,5 hamionik akımlarının dengeli ve dengersiz olması durumları birlikte incelenmiştir. Ayrıca nötr iletken kesitinin

standart değeri ve faz kesitine çıkarılması durumları için nötr-toprak ve tek fazlı yüklerin uçlarındaki gerilimler verilmiştir. Yukarıda verilen sistemde bir arıza olmadığı için, yüklerin toprak uçları toprak potansiyelindedir. Burada toprak iletkeninde gürültü olmadığı kabul edilmiştir. Bir anza olmadığı sürece, transformatörün yıldız noktası topraklama direncinin nötr-toprak gerilimine etkisi yoktur. Burada, dengeli yük durumlarında, 3. harmonikler nötr hattında birbirine eklenmekte, 5. harmonikler ise birbirini yok etmektedir. Yüklerin beslendiği transformatörün primeri üçgen bağlıdır. Bu nedenle harmonikli akımlar çekilmesi durumunda primer tarafta yalnızca pozitif ve negatif bileşen harmonikleri geçmekte, sıfır bileşen (3 ve 3ün katı) harmonikleri transformatörün üçgen bağlı sargılarında dolaşmaktadır.

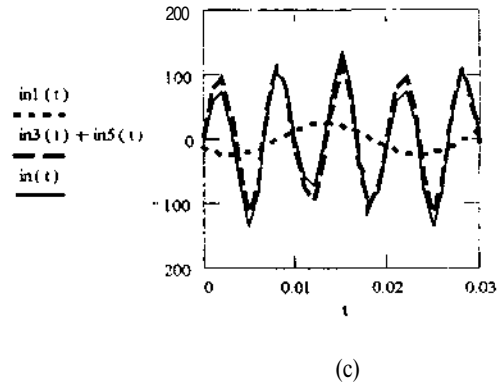
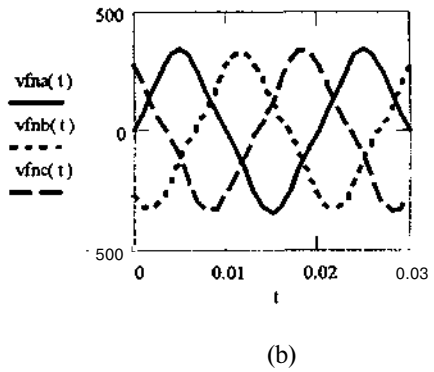
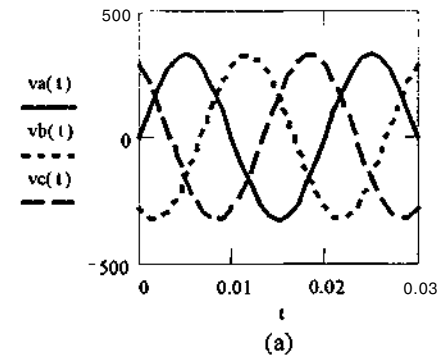
Tablo 2: Dengesiz ve harmonikli durumlar için akım ve gerilimler değerleri

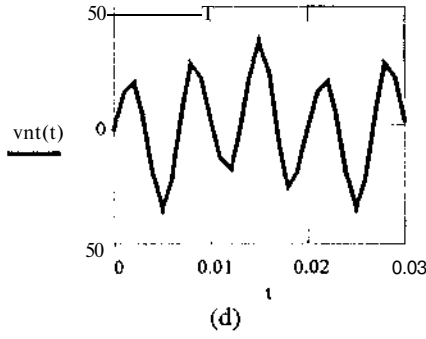
	IV	V	VI	VII	
$i_{la}$ (A)	80	80	80	80	
$i_{lb}$ (A)	100	100	100	100	
$i_{lc}$ (A)	90	90	90	90	
$i_{na}$ (A)	0	20	0	20	
$i_{nb}$ (A)	0	30	0	30	
$i_{nc}$ (A)	0	25	0	25	
$i_{s0}$ (A)	0	0	20	20	
$i_{sb}$ (A)	0	0	30	30	
$i_{sc}$ (A)	0	0	25	25	
$i_a$ (A)	80	82.46	82.46	84.85	
$i_b$ (A)	100	104.4	104.4	108.62	
$i_c$ (A)	90	93.41	93.408	96.69	
$i_{ln}$ (A)	17.321	17.321	17.321	17.321	
$i_{3n}$ (A)	0	75	0	75	
$i_{5n}$ (A)	0	0	8.66	8.66	
$i_n$ (A)	17.321	76.974	19.365	77.46	
$V_{n0}$ (V)	$V_{n0}$ (V)	4.347	19.32	4.86	19.44
	$V_{fn0}$ (V)	224.58	225.56	224.56	225.6
	$V_{fnb}$ (V)	214.74	215.89	214.8	215.96
	$V_{fnc}$ (V)	219.69	220.76	219.72	220.8
$V_{n0}$ (V)	$V_{n0}$ (V)	2	8.852	2.227	8.908
	$V_{fna}$ (V)	222.53	222.79	222.15	222.8
	$V_{fnb}$ (V)	216.77	217.11	216.82	217.15
	$V_{foc}$ (V)	219.65	219.96	219.68	219.98

Elde edilen sonuçlara göre, sistem için en kötü durum Tablo 1 de görülen V. ve VII. durumlarıdır. VII. durumunda temel bileşen ile 3. ve 5. harmonik akımları dengesizdir, ve nötr hattında faz akımlarına yakın bir akım geçmektedir. Bu nötr akımının, nötr hattı üzerinde meydana getirdiği gerilim düşümü nedeni ile nötr-toprak gerilimi ciddi şekilde artmaktadır. Nötr iletkeni kesitinin faz iletkeni kesitine getirilmesi durumunda nötr toprak geriliminde yarı yarıya bir azalma meydana gelmiştir. Nötr toprak gerilimini azaltmak için kesitin artırılması

başka, ikinci bir nötr hattı veya her faza ayrı bir nötr iletkeni çekilmesi mümkün çözümlerdir. Hasas elektronik cihazlar için nötr-toprak geriliminin genliği kadar, gerilimin dalga şekli de önemlidir. Bu gerilime ait dalga şekli Şekil 2(d) de verilmiştir. Yük uçlarındaki gerilim dalga şekli, harmonik akımların meydana getirdiği gerilim düşümü nedeni ile, sinüsoidal değildir. Lineer bir yükün lineer olmayan yüklerle aynı fazdan beslenmesi durumunda uçlarındaki gerilim doğal olarak sinüsoidal olmayacaktır. Tek fazlı lineer yükün lineer olmayan yüklerden aynı fazdan beslenmesi, fakat lineer olmayan yüklerle ortak nötr iletkeni kullanılması durumunda da uçlarındaki gerilim dalga şekli bozulmaktadır. Bu sonuca göre uygun bir çözüm lineer olmayan yüklerin ayrı fazlardan beslenmesi ve bunlar için ayrı nötr iletkeni kullanılmasıdır. Diğer bir çözüm ise uygun tasarlanmış filtre kullanılmasıdır.

Burada incelenen sistemde görüldüğü gibi nötr-toprak gerilimi, dengesiz yükler ve harmoniklerden kaynaklanan nötr akımından dolayı meydana gelmektedir. Arıza durumlarında yıldız noktası geriliminin artacağı ve bununla nötr toprak gerilimini artırma etkisinin olacağı unutulmamalıdır.





Şekil 2 Akım ve gerilimlerin dalga şekilleri

- Faz gerilimleri
- Yük uçlarındaki gerilim
- Nötr akımı ve harmonik bileşenleri
- Nötr-toprak gerilimi

Enerji sistemindeki gürültü; güç elektroniği cihazları, kontrol devreleri, ark cihazları, anahtarlamalı güç kaynakları nedeniyle meydana gelebilir. Güç sisteminde, gürültüyü sistemden uzaklaştıracak topraklama iletkeninin bağlantı hatası da gürültü problemini artırır.

Besleme hattı üzerinde medana gelen elektriksel gürültüler cihazları etkilemektedir. Aynı orta gerilim/alçak gerilim çevirici transformatöre bağlı bir şebeke kolu üzerinde bulunan motor, aydınlatma grupları gibi yüklerin devreye girip çıkması, elektronik motor sürücülerinin ve anahtarlamalı güç kaynaklarının çektiği akımlar, hatlarda, harmonik gerilim düşümlerine sebep olmaktadır.

Özellikle haberleşme cihazları ile çevreye yayılan radyo frekanslı işaretlerin, dalga boyuna bağlı olarak, değişik uzunluktaki iletkenlerde gerilim endüklenmesine neden olmaktadır. Diğer bir elektromagnetik gürültü kaynağı ise aynı ortamda bulunan fakat daha düşük frekansla çalışan cihazların yaydığı parazitlerdir.

#### 4. SONUÇLAR

3 f. iletkenli dağıtım sistemlerinde nötr iletkeninden geçen akımdan kaynaklanan nötr-toprak gerilimi ile toprak iletkenindeki gürültü için alınan önlemler birbirine karıştırılmaktadır.

Yüksek nötr gerilimi ile uğraşıldığı durumlarda faz kesitine eşit nötr Helkeni kullanmak ve nötr akımını gözlemek bir çözümdür. Bu durumda, nötr iletkeni de diğer faz iletkenleri gibi değerlendirilebilir. Yüklerin yüklenmesi nisbeten önlenir (yükten dolayı) bu yöntem yeni olduğu kadar eski tesisatlara da uygulanabilir.

Her bir besleme devresi için tek bir nötr iletkeni kullanılması, her bir devre için aynı nötr iletkeni kullanılması bilgisayar sistemlerinin diğer yüklerle etkileşimini artırır. Bu nedenle nötr hattı çekilebilir.

Her bir besleme devresinde mümkün olduğu kadar dengeli yük sağlanmalıdır. Böylece nötr iletkeninde dengesizlikten kaynaklanan gerilimler ve 3'ün dışındaki harmonik akımları azaltılabilir.

Nötr iletken uzun olduğu durumlarda, nötr-toprak gerilimi belirli bir değerin altında tutulamamaktadır. Bu durumda uzak mesafelere 3 faz ve nötr iletkeni ile dağıtım yapmak yerine, lineer olmayan yüklerin mümkün olduğu kadar yakınına, ihtiyacı karşılayacak güçte üçgen-yıldız bağlı bir transformatör yerleştirilmelidir. Bu transformatör, harmonikler için özel imal edilmiş bir dağıtım transformatörü (K-transformatör) veya bir yalıtım transformatörü olabilir. Böylece yüksek nötr-toprak gerilimlerinin oluşması engellenmektedir. Bu transformatörün yıldız noktası toprağından alınan, toprak iletkenindeki gürültü önceki duruma göre daha azalacaktır. Üçün katı harmonikler transformatörün üçgen sargılarda dolaşacağı için şebeke tarafına yansımaz.

Bir başka yol da nötr hattına, indirici transformatör ile yük merkezi veya hat panosu arasına uygun bir nötr akım filtresi koymaktır. Oç ve üçün katı harmoniklerin hepsi nötr hattından aktığından buraya bu harmonikleri bloke eden sen filtre konulabilir.

#### 4. KAYNAKÇA

- [1] T. Anillaga, *Power System Harmonics*, John Wiley and Sons 1985
- [2] R. C. Dugan, *Electrical Power System Quality*, Mc Graw Hill 1996
- [3] T. M. Gruz, "Power system Problems from High Harmonic Neutral Currents," *Compute. Technol. Rev.*, Winter 1988
- [4] D. O. Koval, "Power Quality Characteristics of Computer Loads," *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 33, No. 3, May/June 1997
- [5] D. O. Koval, "Distribution Customer Power Quality Experience," *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 29, No. 6, November/December 1997
- [6] T. M. Gruz, "A survey of Neutral Currents in Three-phase Computer Power Systems," *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 26, No. 4, July/August 1990
- [7] Ö.Gül, A.Kaypmaz, "Effect of Power Quality on Control Systems Capability" in *Proceedings The 2<sup>nd</sup> International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*,
- [8] Ö.Gül, M.Bayrak, "Power quality and neutral current problems from unbalanced and non-linear loads in three-phase power systems", *15<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution*, CIRE'99 1-4 June, 1999, Nice yayınlanacak.
- [9] A.Liew, "Excessive Neutral Currents in Three-Phase Fluorescent Light Circuits," *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol.25, No.4 July/August 1989.
- [10] Jih-Sheng Lai, T. J. Key, "Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Building," *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 32, No. 5, July/August 1997
- [11] T. S. Key, "Cost and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building," *IEEE Trans. Ind. Application*. Vol. 32, No. 5, September/October 1996

# UME GÜÇ VE ENERJİ LABORATUVARI

Hüseyin ÇAYCI, Savaş ACAK, Erol KAZANÇ  
TÜBİTAK/UME-Güç ve Enerji Laboratuvarı  
PK.21 41470 Gebze/KOCAELİ  
E-mail: huseyin.cayci@ume.tubitak.gov.tr

## ABSTRACT

The power and energy laboratory is responsible for establishment and maintenance of the unit of electrical power and dissemination of its accuracy in Turkey. Laboratory maintains power traceability through the measurements rather than the generation of known power. The laboratory has a high accurate single-phase wattmeter and three-phase power system based on a reference wattmeter. The three-phase power system has been operated at the laboratory since 1997.

The important tasks of the laboratory are the inspection and test of the measuring instruments used in energy supply systems to invoice the energy consumed, besides the calibration of power and energy calibrators, poly-phase watt-hour standards, active and reactive power meters, wattmeters and cos $\phi$ -meters.

## 1. GİRİŞ

UME Güç ve Enerji Laboratuvarı'nın ülke içindeki rolü, güç ve enerji ölçümleri için izlenebilirlik sağlamak ve ülke içinde yer alan tek veya 3-fazlı referans cihazların periyodik kalibrasyonlarını yapmaktır. UME'nin bu işlevi, Sanayi ve Ticaret Bakanlığı ilgilileriyle daha önceden yapılan ortak çalışmalar ile belirlenmiş ve onaylanmıştır.

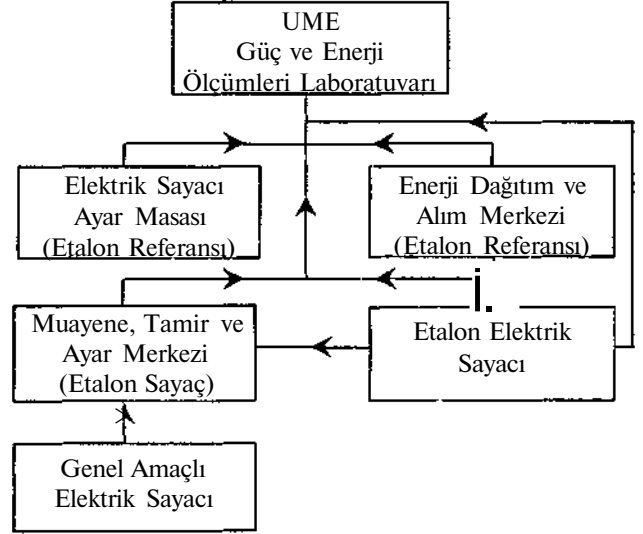
Güç ve enerji ölçümleri için çeşitli cihazlardan sözetmek mümkün olmakla birlikte en çok kullanılanları elektrikli enerji ölçmekte kullanılan elektrik sayaçları ile bunları test etmekte kullanılan ayar masalarında yer alan 3-fazlı referans komparatörlerdir.

Buna göre, Türkiye'de elektrik sayacı veya elektrik sayacı ayar masası üreten, test ve kalibrasyon yapan belli başlı kurum ve kuruluşların ellerinde mevcut sayaç ve etalon referansların bir listesi oluşturulmuş, bu liste ve ihtiyaçlar gözönünde bulundurularak bir "Elektrik Sayacı İzlenebilirlik Zinciri Şeması" hazırlanmıştır (Şekil 1).

Böylece, evlerdeki elektrik sayaçlardan fabrikalarda bulunan referans cihazların kadar izlenebilirlik zinciri sağlanmaktadır.

3-Fazlı enerji ölçümlerinde kullanılan elektrik sayaçları ile bunları test etmekte kullanılan referans cihazların hangi ölçüm noktalarında (hangi akım, gerilim ve güç faktörü değerlerinde), ne şekilde (3 W (3-telli) veya 4W (4-telli)) ve

hangi fonksiyonlar için (aktif /reaktif enerji) kalibre edilmeleri gerektiği yasa ve yönetmeliklerle belirlenmiştir.



Şekil 1. AC güç ve enerji ölçümlerinde izlenebilirlik blok diyagramı.

Test ve kalibrasyonların en iyi şekilde gerçekleştirilebilmesi için UME Güç ve Enerji Laboratuvarı'nda son teknolojiye sahip bir sistem kurulmuştur.

## 2. UME GÜÇ VE ENERJİ ÖLÇÜM SİSTEMİ

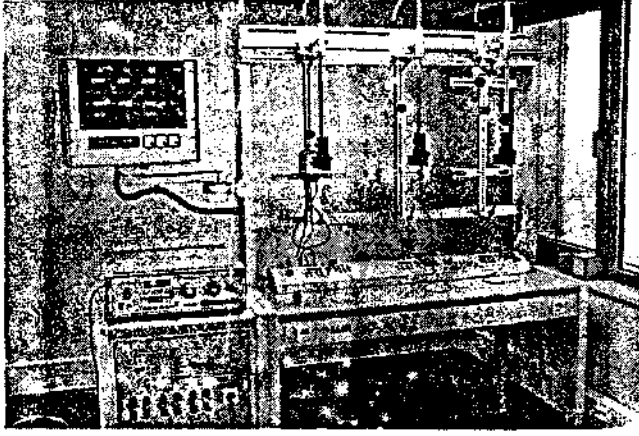
UME'de 1997'den beri faaliyette olan sistem, aynı anda 3 sayacı veya bir referans cihaz; test etmek ve sertifikalandırmak üzere tasarlanmış 3-fazlı bir sistemdir.

Bu sistem ile aşağıda özellikleri verilen ve doğruluk sınıfları 0,2, 0,5, 1 ve 2 olan sayaç veya referans cihazlar test edilebilmektedir:

- \* 2-telli, 3-telli ve 4-telli aktif ve reaktif enerji ölçen sayaçlar.
- \* 4'e kadar mekanik enerji kadranı olan sayaçlar.
- \* -Optik infrared arabirimli (C-A) ve A akımı çevrimi) arabirimli elektronik okuma ünitesi içeren ve 4'e kadar enerji veya güç kadranı olan sayaçlar.
- \* SO-transmitter, SO-pulsu veren türler, sayaçlar.
- \* Elektronik referans Sınıfı.

Laboratuvarında bu sistem yardımıyla, tüketilen enerjiyi faturalamak için kullanılan ölçüm cihazlarının kontrol ve test edilmesinin yanı sıra güç-enerji kalibratörlerin, aktif ve reaktif güç <5 çüm • ihazların, vvatmetreler ve coscp- metrelerin kalibrasyonları da yapılmaktadır.

Sistem tamamen elektronik yollarla akım ve gerilim üretmektedir. Sistemde kullanılan referans standart geniş bir ölçüm kapasite: ine sahip olan doğrudan ölçüm devresine bağlı 3-fazlı bir komparatördür.



Şekil 2. Elektrik sayacı test masası.

Sistemin kontrolü ve test prosedürlerinin kumandası bir PC ile sağlanmaktadır. Uygulanan gerilim ve akım sinyallerinin değerleri ile test edilen sayaçların hataları sistem monitöründe aktüel olarak görüntülenmektedir.

### 2.1 Üç Fazlı Referans Komparatör

UME Güç ve Enerji Laboratuvarı elektrik sayacı test sisteminin referans standardı olan COM303-1, 3-fazlı, 100 ppm (part per million)'den daha iyi doğruluğa sahip, 2 mA - 160 A ile 30 V - 500 V aralıklarıyla Hz - 70 Hz frekans bandında ölçüm yapabilen, ticari olarak mevcut en iyi standarttır Genel olarak elektrik sayacı test sistemi ile birlikte kullanılan cihaz, istenildiğinde tek başına, bağımsız olarak da kullanılabilir.

UME'deki Elektrik Sayan Test Sistemi ile, COM303-1 referans alınarak. 3-fazlı benzer, ancak daha düşük doğruluklu referans cihazların otomatik kalibrasyonu yapılmaktadır. Bu kalibrasyonlarda ölçülecek cihaz sistemde kendisi için ayrılar, yerine konulup, gerekli bağlantılar yapılarak, daha sonra istenen ölçüm noktaları bilgisayar ile ayrılanmak suretiyle otomatik olarak ölçüm hataları bulunur.

Otomatik kalibrasyonu mümkün olmayan bazı referans cihazların kalibrasyonu ise COM303-1 cihazı sistemden ayrı, bakımı/ olarak kullanılmaktadır. Bunun için COM303-1 cihazı, 0.01s.Lek 3-fazlı cihaz, akımbobinleri seri, gerilim bobinleri paralel olacak şekilde kararlı bir 3-fazlı AC güç kaynağı ile beslenir. Ölçüm noktalarındaki cihazın okuduğu değerler karşılaştırılmak suretiyle kalibre

edilen cihazın hataları bulunur. Gerekirse COM303-1'in çıkış frekansı kalibreli bir frekans sayacı ile ölçülüp, eşdeğer güç/enerji değeri hesaplanıp, bulunan bu değer test edilen cihazın güç/enerji değeri ile karşılaştırılmak suretiyle de hata hesaplaması yapılabilir.

Elektrik sayacı test masalarında yer alan referans cihazların, üzerlerine uygulanan güç ile doğrudan orantılı, frekans çıkışları vardır. Cihazların ön veya arka panellerinde bulunabilecek ve genellikle  $f_{out}$  veya  $Zf_{in}$ , simgeleriyle belirlenen bu çıkış frekans sinyalinin değerleri, cihazların bulunduğu ölçüm kademesinde maksimum giriş değerleri (maksimum gerilim, maksimum akım ve 1 güç faktörü) uygulandığı zaman maksimum değerlerine ulaşmakta, diğer ara değerlerde de doğru orantılı bir şekilde azalmaktadırlar. Böylelikle kalibreli bir frekans sayacı kullanılarak, uygulanan güç veya enerji değerine karşılık gelen  $f_{out}$  çıkışı ölçülüp olması gereken (hesaplanan-teorik) değerle karşılaştırılmak suretiyle, cihazın o ölçüm noktasındaki hatası bulunabilmekte, bir başka deyişle kalibrasyonu yapılabilmektedir.

Test ayar masalarında yer alan bu tür referansların daha üst seviyeli bir referans ile kalibrasyonu sırasında, örneğin bir sayaç masasında yer alan 3-fazlı ve 0.1 veya 0.05 doğruluk sınıfına ait referans bir cihazın, UME'nin 0.01 doğruluk sınıfına ait referans cihazı COM303-1 ile kalibrasyonu sırasında, ölçülecek cihazın çıkış frekansı bir frekans sayacı yerine, COM303-1'in girişine girilmek suretiyle ölçülmektedir. COM303-1 ise bu girilen frekans değerini ölçüp, belirli işlemlere tabi tutarak test edilen cihazın hatasını hesaplamaktadır.

### 2.2 Tek Fazlı Referans Komparatör

Güç ve enerji ölçüm standardı olan K2004, rms gerilim, akım, güç ve enerji ölçümleri için geliştirilmiş bir cihazdır [1]. AC güç/enerji ölçümlerinde UME'de referans standart olarak kullanılmaktadır. Belirli periyotlarla (3 yılda bir) Alman Metroloji Enstitüsü olan PTB'ye gönderilmek suretiyle kalibre edilmekte ve izlenebilirliği UME'ye oradan da ülkedeki güç/enerji ölçen her türlü referans ve/veya cihaza aktarılmaktadır. Cihaz tek-fazlı olmasına rağmen 3-fazlı referans cihazların kalibrasyonlarında da kullanılabilir. Bu kalibrasyonda önce tek-fazlı kararlı AC güç kaynağından uygulanan güç değerinin primer güç ölçüm sistemi ile gerçek değeri saptanmakta ve bu değer K2004 cihazının o ölçüm noktasındaki okuması ile karşılaştırılarak cihazın hatası hesaplanmaktadır.

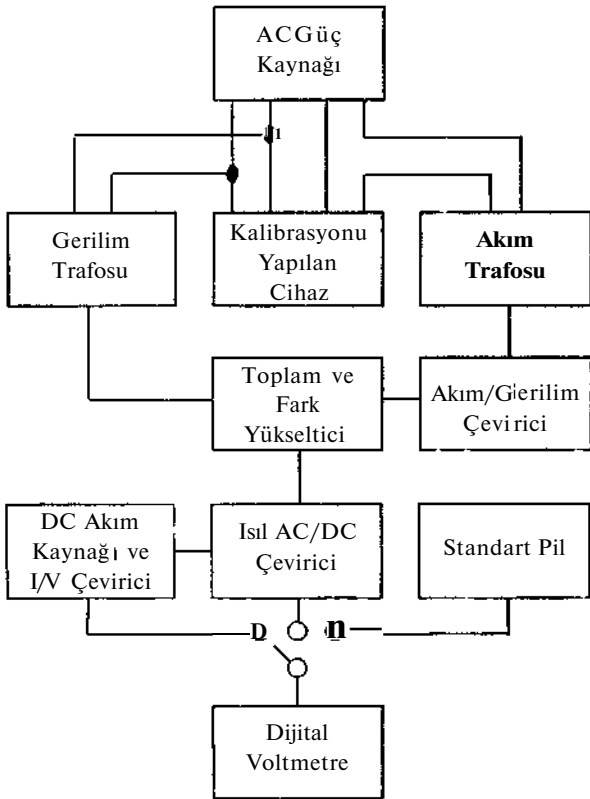
UME'nin üç fazlı referans standardı COM303-1'in kalibrasyonu da K2004 ile gerçekleştirilmektedir. K2004'ün tek-fazlı, COM303-1'in ise 3-fazlı referans olmalarından dolayı COM303-1'in K2004 ile kalibrasyonu gerçek 3-fazlı bir kalibrasyon olmayacaktır. Ancak COM303-1'in ayrı ayrı K2004 ile karşılaştırılmak suretiyle kalibrasyonu mümkündür.

K2004'ün üç yılda bir PTB'ye gönderilip birincil seviye güç sistemi ile kalibrasyonunun yapıldığından daha önceki paragraflarda anlatılmıştı. Bunun yanı sıra devamlı

olarak yapılması gereken ve UME'de gerçekleştirdiğimiz iki önemli test vardır. Bunlar, CAL1 ve CAL2 diye isimlendirilen referansın gerilim ve zaman fonksiyonlarının testleridir. Bir standart pil veya 1.018 V'luk elektronik gerilim referansı kullanılarak yapılan CAL1 testinin 3 aylık periyotlarla tekrarlanır ve testler sonucu bulunan gösterge değerleri cihazın PTB tarafından verilen kalibrasyon sertifikasında belirtilen DC gösterge değerleri ile karşılaştırılır. CAL2 testi cihazın zaman bazını kontrol etmek amacıyla yapılan bir testtir. Cihazın zaman bazı enerji (W(kJ)) ölçümlerinde kullanılmaktadır. CAL2 testi sonucunda cihazın zaman hataları bulunmaktadır.

### 3. BİRİNCİL SEVİYE GÜÇ ÖLÇÜM SİSTEMİ

UME'de kurulması düşünülen ve PTB'de de kullanılmakta olan primer güç ölçüm sistemi, içerisinde bulunan ve termal AC/DC transfer prensiplerine göre çalışan 2 MJTC (Multijunction Thermal Converter/Çoklu Eklem Isıl Çevirici) üzerinden "Toplam ve Fark" (Sum and Difference) yöntemi ile aktif güç (P) ölçen tek-fazlı bir sistemdir. 3-fazlı ölçümlerdeki izlenebilirlik yine bu sistem üzerinden sağlanmaktadır. Sistemde yer alan ve sistemin ana kısmını teşkil eden MJTC'lerin her biri ayrı ve aynı anda, uygulanan AC akım ve AC gerilim sinyallerinin gerçek değerini bulmakta kullanılmakta, bulunan bu değerler ile de aşağıda daha ayrıntılı olarak açıklanacak olan "toplam ve fark" yöntemi ile ölçülecek aktif gücün (P) gerçek değeri hesaplanmaktadır. Bu şekilde saptanan primer güç değeri ile K2004 gibi referans wattmetrelerin kalibrasyonları yapılmaktadır [2].



Şekil 3. Birincil seviye güç ölçüm sisteminin blok şeması.

Sistemde yer alan AC güç kaynağından alınan ve aralarında istenen değerlerde faz farkı yaratılabilecek AC akım ve AC gerilim sinyalleri MJTC'lerin uygulanmaya elverişli değerlere bölünmek suretiyle öncelikle özel olarak tasarlanıp üretilmiş akım transformatörü ve gerilim transformatörü üzerine uygulanır. Akım transformatörünün sekonder akımı, değeri bilinen bir yük üzerinden akıtılmak suretiyle  $+U_1$  gerilimine dönüştürülür. Yine akım transformatörü üzerinde oluşmuş olan  $+U_1$  gerilimi,  $180^\circ$  faz kaydırılması suretiyle  $-U_1$  gerilimi elde edilir. Gerilim transformatörü üzerinden de uygun genlikli  $U_2$  sinyali elde edilir.

Elde edilen bu AC gerilim sinyalleri ( $+U_1$ ,  $-U_1$  ve  $U_2$ ), uygun kombinasyonlarda özel olarak tasarlanmış toplam ve fark yükselticilerine aktarılmak suretiyle yükseltici çıkışlarında ( $U_2+U_1$ ) ve ( $U_2-U_1$ ) sinyalleri elde edilir. Bu toplam ve fark sinyalleri MJTC'lere uygulanıp standartların çıkışlarında oluşan gerilimler sistemde yer alan nanovoltmetreler ile okunur. Daha sonra kalibreli bir DC kaynaktan elde edilen DC akımlar akım/gerilim çevirici üzerinden MJTC'lere uygulanıp aynı çıkış gerilimleri elde edilene kadar kaynak üzerinde ayarlama yapılır. Aynı işlemler DC akım polaritesi değiştirilip tekrarlanır. MJTC çıkışlarında AC toplam ve fark sinyallerinin yarattığı gerilime eşit veya ona çok yakın bir gerilim yaratan I ve A DC kaynak akımlarının gerçek değerleri bir standart direnç veya kalibreli akım şöntü kullanılarak saptanır.

Bu şekilde değerleri saptanan toplam E ( $U_2+U_1$ , ve fark A ( $U_2-U_1$ ), değerleri kullanılarak, aşağıdaki eşitlikle aktif güç P değeri hesaplanır:

$$P = \frac{1}{4} \left[ (U_2 + U_1)^2 - (U_2 - U_1)^2 \right]$$

### 4. SONUÇ

UME Güç ve Enerji Laboratuvarında yer alan elektrik sayacı test sistemi, sadece bir elektrik sayacı kalibrasyon düzeneği olarak algılanmamalıdır. Elektrik sayaçlarının kalibrasyonu, cihazın çeşitli koşullar altında, üretici firma tarafından belirlenen hata sınırlarının içinde çalışıp çalışmadığının kontrol edilmesi işlemlerinden ibarettir. UME'deki bu sistem ise, Türkiye'de yer alan çok sayıda cihazların kalibrasyonları için gerekli bir sistemdir.

### 5. KAYNAKÇA

- [1] G.Schuster, IEEE Trans. IM-29(1980) 15?
- [2] "UME Gerilim Laboratuvar Elektriksel Metro İnji Eğitim Notları", 1997

# HIZLI-AYRIK GÜÇ AKIŞ METODUNUN ÖZ DEĞER ANALİZİ

Hasan DAĞ

Elektrik - Elektronik Fakültesi  
Elektrik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
80626 Maslak, İstanbul  
E-mail : dag@elk.itu.edu.tr

## ABSTRACT

Load flow is one of the most frequently used analyses in electric power system studies. Due to the need of faster solution times for the problem, the fast-decoupled load flow method (FDLF) was developed in seventies and is been used ever since. The method makes physical-structure based assumptions and thus reduces an iteration-based matrix to a constant one. As a result, the matrix is not computed and factorized every iteration. Instead, a matrix is computed and factorized once. The essence of method lies in approximating the Jacobean matrix of a non-linear set of equations with a constant matrix. Although there has been many other approximations, but none of the methods works as the one in FDLF. In this paper, we explain mathematically as to why this particular approximation works by using eigenvalue analysis.

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerji sistemlerinde yapılmakta olan analizlerin büyük bir çoğunluğu yük (güç) akışını içermektedir. Lineer olmayan bir denklem takımının çözümü olan yük akış problemi, kısa sürede bir çözümün veya yaklaşık bir çözümün gerektiği durumlarda hızlı-ayrık yük akış metodu (Fast Decoupled Load Flow (FDLF)) [1-2] ile yapılmaktadır. Aksi hallerde denklem takımı Newton-Raphson metodu [3] ile çözülmektedir, hızlı-ayrık yük akış metodu, sistemin fiziksel özelliklerini ve bazı temel matematiksel varsayımları kullandığından denklem takımı için daha kısa sürede bir çözüm üretilmektedir. Aslında, yinelemeli bir çözüm tekniğinde her adımda hesaplanmakta olan Jacobean matrisini başlangıç koşullarında sabit bir matris olarak hesaplayan bu metoda benzer ancak daha önceleri önerilmiş [4] fakat bunların çoğu fazla başarılı olamamıştır. Ayrıca FDLF da tüm problemler için yakınsamayı sağlar. Bu çalışmada hızlı-ayrık yük akış metodunun neden ve nerede kullanılabilirliği araştırılmaktadır.

Yük akışı, enerji iletim sistemlerinin en sık karşılaşılan bir problemidir. Bu nedenle, hızlı-ayrık yük akışı analizi, durum kestirimi ve kararlılık analizi için yük akışını gerektiren analizlerin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır.

$$f(x) = 0 \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. İfadede;  $f()$  lineer olmayan bir vektör fonksiyonunu  $x$  ise durum değişkenlerini göstermektedir. Klasik yük akışı için  $x$  bara gerilimlerinin genlikleri ve faz açılarından oluşur. Durum değişkenleri; en genel halde çeşitli kontrol parametrelerini, güç elektroniği elemanlarının tetikleme açıları ve transformatörlerin ayar kademelerini de içermektedir. Newton-Raphson metodu kullanılarak denklem takımı

$$x^{k+1} = x^k - f(x^k) J^{-1}(x^k) \quad (2)$$

ifadesiyle durum değişkenleri için çözülür [3]. Denklem (2)'deki  $J(x^k)$  terimi lineer olmayan denklem sisteminin Jacobean matrisi olup aktif ve reaktif güçlerin bara gerilimlerinin faz açılarına ve genliklerine, kısaca durum değişkenlerine göre değişimlerini içermektedir. Örneğin,  $k$ . yinelemede Jacobean matrisi,

$$J(x^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial S} & \frac{dP}{dV} \\ \frac{\partial Q}{\partial S} & \frac{dQ}{dV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & IV \\ M & L \end{bmatrix} \quad (3)$$

olup,  $k$ . durum değişkenlerinin yerine konulması ile sabit bir matris halini alır.

Bilindiği üzere aktif güçlerin faz açılarındaki değişimlere duyarlılıkları ( $H$ ) ve reaktif güçlerin ise gerilim genliklerindeki değişimlere duyarlılıkları ( $L$ ), sırasıyla aktif güçlerin gerilim genliklerine ( $N$ ) ve reaktif güçlerin ise faz açılarındaki değişimlere ( $M$ ) duyarlılıklarına göre daha fazladır. Sadece bu fiziksel özelliği kullanarak yukarıdaki Jacobean matrisi

$$J_A(x^k) \cong \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial S} & 0 \\ 0 & \frac{dQ}{dV} \end{bmatrix} \quad (4)$$

haline indirgenebilir. Bu haliyle, yük akış problemi aktif ve reaktif güçler için ayrı ayrı yapılabilir ve ayrık yük akış adımları alır. Bu ayrık yük akışı metodunda  $H$  ve  $L$  alt matrisleri her yinelemede durum değişkenlerinin yeni değerleri için hesaplanır ve kullanıldıkları lineer denklem



takımı için üçgen matrislere ayrıştırılırlar. Bu nedenle Newton-Raphson metoduna oranla hızlanmış olur. Stott ve Alsac [1] güç sistemlerine ait fiziksel başka varsayımları da, örneğin gerilim genliklerinin 1.0 per-unit civarında kalmaları, yaparak Jacobean matrisini durum değişkenlerine bağlı olmayan sabit bir matris olarak

$$J_{HA}(x^0) \cong \begin{bmatrix} B' & O \\ O & B'' \end{bmatrix} \quad (5)$$

ifade etmektedirler. Bu sayede, Jacobean matrisin her yinelemede hesaplanması ve lineer denklem sisteminin çözümünde üçgen matrislere ayrıştırılması gerekmemektedir.  $B'$  ve  $B''$  matrislerinden oluşan Jacobean matrisi durum değişkenlerinin sadece başlangıç koşulları için hesaplanır ve ayrıştırılır. Bu ayrık matrisler, lineer olmayan denklem takımının çözümü bulununcaya kadar kullanılırlar. Güç akış problemi bu değişikliklerden sonra hızlı-ayrık yük akışı (Fast Decoupled Load Flow) adını alır ve her yineleme

$$\begin{aligned} B' \Delta \delta &= \Delta P / |V| \\ B'' \Delta |V| &= \Delta Q / |V| \end{aligned} \quad (6)$$

şeklinde iki küçük lineer denklem takımının çözümünden ibaret olur.  $B'$  ve  $B''$  katsayı matrislerinin bir defaya mahsus yapılan ayrıştırılmış hallerinin kullanılması, çözüm süresini Newton-Raphson ve ayrık-yük akış yöntemlerine oranla kısaltmaktadır. Newton-Raphson metodunda Jacobean matrisi her yinelemede durum değişkenlerinin yeni değerlerine göre hesaplanır ve ayrıştırılır. Bu ise problemin çözümünü yavaşlatır.

Yük akışında karşılaştığımız lineer olmayan denklem takımının çözümü Newton-Raphson metodunu kullanarak 3 ile 5 yinelemede bulunabilmektedir. Aynı denklem takımını hızlı-ayrık yük akış metodu ile çözdüğümüzde yineleme sayısı 7 veya 8 den fazla olabilmektedir. Her yinelemede yapılan işlem sayısının FDLF da çok daha az olmasından ötürü metot hızlı kalmaktadır.

Bu çalışmada üzerinde durulan konu, lineer olmayan denklem sisteminin çözümünün, Jacobean matrisindeki bu değişikliklere rağmen, bulunabilmesinin sebeplerinin araştırılmasıdır. Yani, bu çalışma, yapılan bunca ihmalin problemin çözümünü neder iraksatmadığı sorusuna cevap bulmağa çalışmaktadır. Bu soruya daha önceleri cevap aranmış [5-9] fakat verilen cevaplar ya çok teorik kalmış [7], yada deneysel bir takım sayılardan ibaret olmuştur. Sorunun cevabını, bu çalışmada, önce matematiksel olarak ifade ettikten sonra çeşitli test sistemlerinde uygulamasına bakacağız.

Dikkat edecek olursak, yapılan tüm ihmaller Jacobean matrisine uygulanmaktadır. Bir matrisin kendisinin tersiyle çarpımı birim matrisi verdiği göre, yapılan tüm yaklaşımlardaki Jacobean matrislerinin terslerinin gerçek Jacobean matrisle çarpımının birim matrise ne kadar yaklaştığı bize yapılan varsayımların doğruluğu hakkında bir bilgi vermektedir. Yani, gerçek sistemin Jacobean matrisini  $J$  ile, ayrık yük akışındaki Jacobean matrisi  $J_A$  ve

hızlı-ayrık yük akışındaki Jacobean matrisi  $J_{HA}$  ile gösterirsek,

$$\begin{aligned} I &\cong J \cdot J_A^{-1} \\ &\text{ve} \\ I &\cong J \cdot J_{HA}^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

olması gerekir. Denklem (7)' de  $I$  birim matrisi göstermektedir ve denklemin sağ tarafı soldan çıkarıldığında kalan matrisin sıfır olması beklenir. Yapılan varsayımlar iyi ise fark matrisinin (yineleme matrisi) en büyük genliğe sahip öz değerinin genliği birden küçük olmalıdır ki, bu matrislerden oluşan lineer denklem sisteminin yinelemeli çözümleri yakınsasın. (Daha fazla detay için Ek A' ya bakınız). Özetle, yapılacak olan tüm ihmal veya varsayımlar sonucunda denklem takımının Jacobean matrisi ( $J_{yeni}$ ) gerçek Jacobean matrisinden fazla farklı olmamalıdır. Burada farktan kasıt,

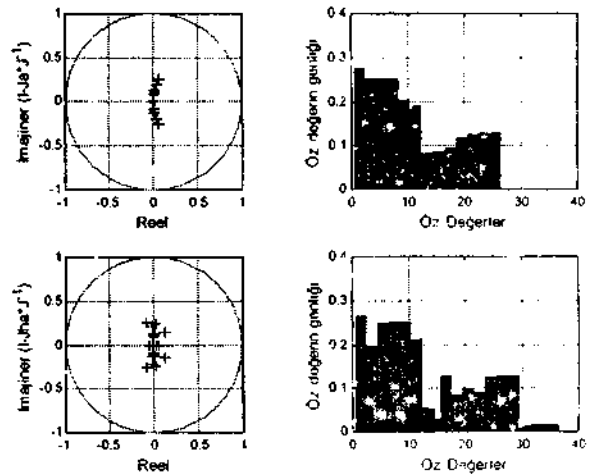
$$t = I - J_{yeni} \quad (8)$$

bulunan yeni Jacobean matrisinin oluşturduğu fark matrisinin ( $F$ ) en büyük öz değerinin birden küçük olmasıdır.

## 2. TESTLER VE YORUMU

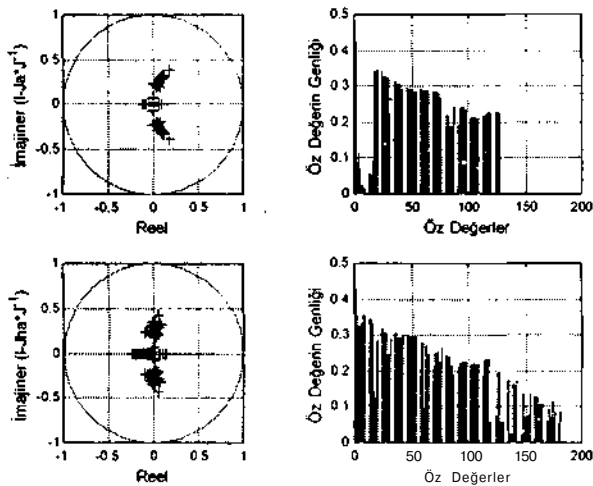
Bu bölümde çeşitli test sistemleri için Jacobean matrisi yerine  $J_A$  veya  $J_{HA}$  matrisinin kullanılmasıyla oluşan hata (yineleme) matrisinin öz değerleri seki! üzerinde gösterilmektedir. Yani, her iki metodun yineleme matrisinin öz değerleri kompleks yarı düzlemde ve yine aynı matrislerin öz değerlerinin genliklerinin dağılımı Şekil 1 ve Şekil 2 de gösterilmektedir.

Şekil 1, IEEE 24 baralı sisteme ve Şekil 2 ise IEEE 118 baralı sisteme aittir. Her iki durumda da öz değerlerin genliklerinin 1 den küçük olduğu ve ayrık ile hızlı-ayrık yük akış metodlarının problemi çözebileceği görülmektedir.



Şekil 1. IEEE 118 baralı sistem için öz değerlerin kompleks düzlemde gösterimi (solda) ve genlikleri (sağda) Üstteki şekiller ayrık yük akışı alttakiler ise hızlı-ayrık yük akışı Jacobean matrisleri için verilmiştir.

Ayrıca, hızlı-aynık yük akış metodunda öz değerlerin birbirine daha yakın oldukları bu nedenle yinelemeli çözüm yönteminin ayrıntı yük akışına oranla daha hızlı yakınsayacağı söylenebilir [10,11]. Bunun nedeni ise,  $J_{HA}$  matrisinin  $J_A$  matrisine oranla sistemin Jacobean matrisini daha iyi taklit etmesindedir.



Şekil 2. IEEE 118 baralı sistem için öz değerlerin kompleks düzlemde gösterimi (solda) ve genlikleri (sağda). Üstteki şekiller ayrıntı yük akışı alttakiler ise hızlı-aynık yük akışı Jacobean matrisleri için verilmiştir.

### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, özellikle hızlı-aynık yük akışı metodu olmak üzere, ayrıntı yük akış metodlarının neden doğru bir çözüm üretebildikleri öz değer analizi ile irdelenmiş ve irdeme yönteminin basitliği sebebi ile rahatlıkla uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Hızlı-aynık yük akış metodunun bir güç sistemine uygulanmasında problemin yakınsayıp yakınsamayacağı veya yakınsamaması halinde neden yakınsamadığı basit bir testle görülebilir. Ayrıca, bu konuda çalışmakta olan araştırmacılar geliştirdikleri; metodları bu çalışmada gösterilen yöntemle deneycek metodları hakkında bilgi edinebilirler.

### 4. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada gerek yorumları üç gerekse maddi hataların düzeltilmesi açısından yardımlarını esirgeyen Ar. Gör. F. Gül Bağrıyanık'a teşekkürlerimi sunarım.

### 5. EKA

Bu bölümde,  $Ax = b$  şeklindeki bir lineer denklem takımının yinelemeli çözümü üzerinde durulacaktır. Lineer denklem sistemi Gauss eliminyasyonu yöntemiyle LU ayrışmasıyla çözülebileceği gibi yinelemeli yöntemlerle (Gauss, Jacobi, SOR vs [12]) da çözülebilir. Yinelemeli çözüm tekniklerinde esas olarak,  $A$  katsayıdır.

gibi iki matrise ayrıştırılır. Önemli olan nokta 5 matrisinin tekil olmamasıdır. Bu ayrıştırmayla lineer denklem takımı

$$Sx_{k+1} = Tx_k + b \quad (A.1)$$

şeklinde yazılabilir [12]. Eğer  $k$ . yinelemede hata (gerçek çözüm ile o yinelemede bulunan çözüm arasındaki fark)

$$e_k = x_k - x \quad (A.2)$$

olarak ifade edilir ve  $Ax = b$ 'de  $A$  yerine  $S^{-1}$  konulup denklem (A.1)'den çıkarılırsa

$$Se_{k+1} = Te_k \quad (A.3)$$

denklem takımı elde edilir. Denklem (A.3)'ün her iki tarafı soldan  $S^{-1}$  ile çarpılır ve  $C = S^{-1}T$  tanımı yapılırsa (A.3),

$$e_{k+1} = Ce_k \quad (A.4)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Burada,

$$\begin{aligned} e_1 &= Ce_0, \\ e_2 &= C^2 e_1, \\ e_3 &= C^3 e_2, \\ &\vdots \\ e_{k+1} &= C^k e_0, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (A.5)$$

Yineleme sayısı ( $k$ ) arttıkça, eğer  $C$  sifıra yakınsıyorsa,  $e_k$  da sifıra yakınsar. Aksi halde, bazı özel durumlar ( $e_0 = 0$ )  $e_k$  hariç, problemin çözümü ıraksayacaktır. Denklem (A.4)'ün normu alındığında

$$\|e_k\| \leq \|C^k\| \cdot \|e_0\| \leq \|C\|^k \cdot \|e_0\| \quad (A.6)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeden,  $\|C\|$ 'nin birden küçük olması durumunda hatanın, yineleme sayısı arttıkça, düştüğü açıkça görülmektedir. Yani, hata sifıra gitmektedir.

Denklem (A.6)'daki  $C$  matrisi öz değer ve öz vektörleri cinsinden ifade edilirse

$$C = VW^{-1} \quad (A.7)$$

$C = WA^{-1}W^{-1}$  ve  $\|C\|^k = \prod_{i=1}^n |A_i|^{-k} |W_i|^{-k}$  olarak yazılabilir ve ifade,

$$\|x_k - x\| \leq K(W) \rho(C)^k \|x_0 - x\| \quad (A.8)$$

halini alır. Yukarıdaki ifadelerde  $W$  matrisi  $C$  matrisini öz vektörlerinden oluşan bir tersinir matris,  $A$  ise  $C$  nin öz değerlerinden oluşan bir köşegen matristir. Üstteki ifadede, hatanın yinelemeye bağlı olarak mutlak değerce en büyük olan öz değere,  $\rho(C) = \max(|\lambda_j|, j=1, 2, \dots, n)$  göre nasıl yakınsayacağı açıkça görülmektedir [12]. Matrisin bu mutlak değerce en büyük olan öz değerine o matrisin spektral yarıçapı denir.

<sup>1</sup> Matrisin determinantının sıfırdan farklı olması o matrisin tersinir, (n x n) bulunabileceğini gösterir. Dolayısıyla bu tür matrislere tekil matris denir.

Denklem (A.8) lineer denklem takımının çözümünün yakınsamasında hatanın üst sınırını verir. Yakınsama daha hızlı olabilir. Bu ifadede  $v(J^k) = \|V^{-1}\|_p$  olup,  $C$  matrisinin elemanlarında yapılacak olan herhangi bir değişikliğin bu matrisin oluşturduğu denklem takımının çözümüne,  $p$ -normuna göre etkisini ifade etmektedir. Bu sayının bir veya bire yakın olması istenen bir durumdur ve bu sayıya matrisin durum sayısı adı verilir [12].

#### 6. KAYNAKÇA

- [1] B. Stott ve O. Alsac. "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3. pp. 859-869, May/June 1974.
- [2] R. A. M van Amerongen, "General-Purpose Version of the Fast Decoupled Loadflow", IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 2. No. 2. pp. 760-766. May 1989.
- [3] W. F. Tinney ve C. E. Hart. "Power Flow Solution by Newton's Method". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-86. pp. 1449-1460, 1970.
- [4] B. Stott "Review of Loadflow Calculation Methods", Proceedings of the IEEE, Vol. 62. pp. 916-929. 1974.
- [5] A. Monticelli, A. Gardá ve O. R Saavedra. "Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivatives and Testing". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 5, No. 4, pp. 1425-1431. November 1990.
- [6] S. Deckmann, A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott ve O. Alsac "Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2292-2300, November/December 1980.
- [7] F. F. Wu, "Theoretical Study of the Convergence of the Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 1, pp. 268-275, January/February 1977.
- [8] J. Nanda, D. P. Kothari, S. C. Sirvastava, "Some Important Observations on Fast Decoupled Load Flow Algorithm", Proceedings of IEEE, Vol. PAS-75, No. 5, pp. 732-733, May 1987.
- [9] P. S. Nagendra Rao, K. S. Prahasa Rao ve J. Nanda. "An Empirical Criterion for the Convergence of the Fast Decoupled Load Flow Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, pp. 974-981, 1984.
- [10] G. H. Golub ve C. F. Van Loan, "Matrix Computations", The Johns Hopkins University Press, Second Edition. 1989.
- [11] O. Axelsson. "Iterative Solution Methods", Cambridge University Press, 1994.
- [12] W. W. Hager. "Applied Numerical Linear Algebra". Prentice-Hall. 1988.

**Vedat Gün**

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Celal Bayar Üniversitesi  
Muradiye Kampusu - Manisa

**ABSTRACT**

*in this study, transient analysis due to short current fault conditions on underground power cables are investigated. The method of solution developed is based on the modified Fourier Transform technique. Mathematical formulations of the transient responses are first obtained in frequency domain. Then the solutions are found in time domain using inverse Fourier Transform Technique. The effect of fault, source impedance are investigated. This investigations are based on computer simulation.*

**1.GİRİŞ**

Bu çalışmada yeraltı enerji kablolarında kablo yüksüz iken meydana gelen kısa devre arızalarından dolayı oluşan geçici akım ve gerilimler incelenmiştir. Kaynak empedansının etkisi özel olarak ele alınmıştır. Analiz yöntemi olarak geliştirilmiş Fourier Dönüşüm Tekniği kullanılmıştır.

Ele alınan kablo 154 kV luk tek çekirdekli hır kablo olup kablo çaprazlanmış ve ana bölme uçlarından doğrudan topraklanmıştır.

**2.ÇAPRAZLANMIŞ KABLO SİSTEMLERİNİN GEÇİCİ HAL CEVABI**

Kablo sistemlerine ait empedans ve admitans r.uüMİsleri 1 No' lu kaynakta açıklandığı şekilde hesaplanır [ 1 ]

**M. Uğur ÜNVER**

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Sakarya Üniversitesi  
54040 Sakarya

Bir hattın dağılmış hat parametreleri gözönüne alındığında n iletkenli bir sistemde x mesafesi için için frekans domeninde;

$$d^2 \tilde{V} / dx^2 = Z.Y. \tilde{V} = P. \tilde{V} \quad (2.1)$$

$$d^2 \mathbf{T} / dx^2 = Y.Z. \mathbf{T} = \mathbf{p}^T. \hat{\mathbf{f}} \quad (2.2)$$

denklemleri yazılır. Bu denklemler gerekli düzenlemeler yapılarak kablo başı ve kablo sonu değerleri cinsinden matris biçimde;

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_s \\ \tilde{I}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0 \coth(\gamma l) & - Y_0 \operatorname{cosech}(0l) \\ - Y_0 \operatorname{cosech}(0l) & Y_0 \coth(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_s \\ \tilde{V}_r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3), homojen bir sistemin admitans matrisini gösterir ve iki kapılı düğüm denklemi olarak da ifade edilebilir. (Cablo başı ve kablo sonu gerilimleri bu matris denkleminde elde edilebilir.

Elde edilen bu denklemler düzeltilmiş Fourier Dönüşüm Tekniği kullanılarak çözülür [2]

**3. KABLO SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE ARIZA ANALİZİ**

Kablo sistemlerinde olan arızalar, superpo/.isyon yöntemi uygulanarak i.inüile edilir. Arıza başlangıcıyla ilgili sınımlayın için gerekli adımlar aşağıdaki gibidir:

1) Önce, arızanın oluşumu dikkate alınmadan, arıza öncesi sistemin sürekli hal durumu göz önüne alınır.

2) İkinci olarak temsili bir gerilim kaynağı arıza noktasına uygulanır ve bu sırada sistemdeki diğer gerilim kaynakları kısa devre edilir. Temsili kaynak arıza noktasında hesaplanan arıza noktasındaki arıza öncesi gerilime eşit fakat ters polaritededir. Temsili kaynak uygulaması anahtar kapama işlemiyle yapılır.  $t=0$  anı arızanın başlangıç anı kabul edilerek kısa devre hesaplamaları yapılır ve kısa devre akım eğrileri elde edilir.

3) Sonuç olarak arızalı duruma ait değerler 1 ve 2' de elde edilen cevapların toplanmasıyla elde edilir.

Bu adımların uygulanmasıyla elde edilen ifadeler süperpozisyon prensibinin uygulanmasıyla;

$$V_A(t) = V'_A(t) + V''_A(t)$$

$$i_A(t) = i'_A(t) + i''_A(t)$$

biçiminde yazılır.

### 3.1. Arıza tipinin temsil edilmesi

Arıza tipini ifade etmek için bir  $Y_p$  arıza admitans matrisi tarif edilir.  $Y_p$  matrisi, kablunun faz iletkeni sayısı  $n$  ise  $n \times n$  boyutundadır. Tek faz-toprak, faz-faz veya çift faz-toprak arızalarında eğer sonlu arıza empedansı yok iken faz ve toprak arasında veya herhangi iki faz arasında bağlantı yoksa o zaman bu fazlar-toprak arasında veya bu fazlar arasında sonsuz empedans veya sıfır admitans olduğu farz edilir. Toprak arızaları sırasında sadece arıza admitans matrisinin köşegen terimleri bulunur diğer terimler sıfırdır. 1 ek faz toprak arızası için (b fazı arızalı olsun)  $1/a$  admitans matrisi;

$$Y_F = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.2)$$

dir.

burada  $Y_a = 1/R_a$  ve  $Y^1/R, \dots, R_a$  ve  $R_c$  arızalı faz ile toprak arasındaki arıza dirençleridir.

Bütün arıza empedansları resistif kabul edilmiştir. Eğer arızalı faz diğer faz veya toprakla sıkı bir şekilde temas halindeyse arıza direnci  $10^{-6}$  alınmıştır.

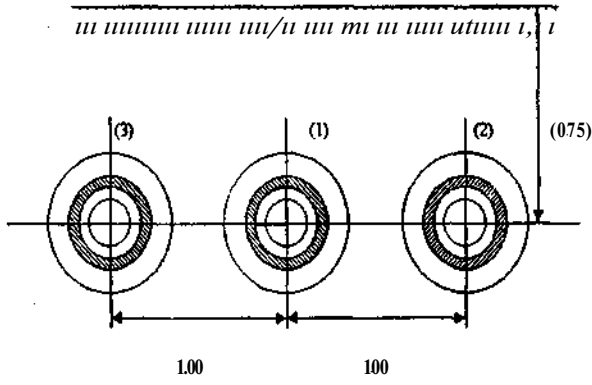
Kablo sistemine ait arıza şartlarının simülasyonu ve denklemlerin çözümleri 2 No' lu kaynakta açıklandığı gibi yapılır [3].

### 4 Uygulama Çalışmaları ve Sonuçlar

Uygulamada 2XS(FL)2YX1X1000 RMF 89/154 Kv tipi tek çekirdekli bir kablo kullanılmış olup kabloya ait değerler Tablo 4.1' de verilmiştir. Sistem 154J4-V luk olup kablo uzunluğu 30 km' dir. Arıza kablonun 15.inci km' sinde meydana gelmiştir. Kabloların toprak altında yerleşimi Şekil 4.1' de gösterilmiş olup ölçüler metre cinsindedir.

TABLO 4.1. Kullanılan Kablonun Karakteristik Değerleri

Çekirdek Yarıçapı:	1.55 cm
Kılıfın İç Yarıçapı:	4.1 cm
Kılıfın Dış Yarıçapı:	4.55 cm
Kablo Dış Yarıçapı:	5.00 cm
Çekirdeğin Özdirenci:	$1.71 \cdot 10^{-8}$ ohm-m
Kılıfın Özdirenci:	$3.58 \cdot 10^{-8}$ ohm-m
Ana İzolasyonun Bağıl Dielektrik Sabiti:	4.2
Çekirdek İzolasyonunun Bağıl Dielektrik Sabiti:	2.4
Çekirdeğin Geçirgenlik Katsayısı:	1.0
Kılıfın Geçirgenlik Katsayısı:	1.0



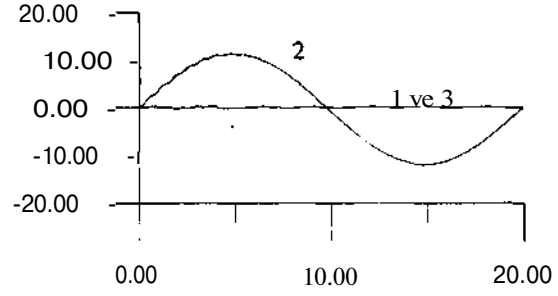
Şekil 4.1 Kablo Sisteminin Konumu

Yük akımının etkisi incelenirken sistemde tek faz-toprak arızası olduğu ve arızanın 2. nci fazda olduğu farzedilmiştir. 1 ve 3 No' lu eğri sağlam fazlara, 2 No' lu eğri arızalı faza aittir.

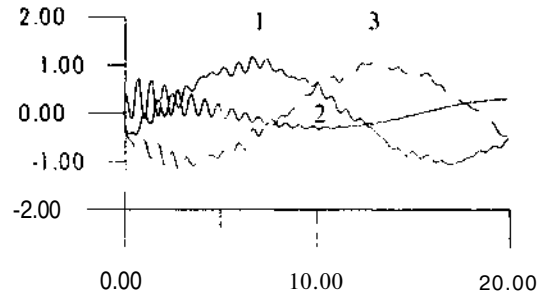
Kablo başı ve arıza noktasına ait dalga şekilleri, yük akımının maksimum akımın yansı olduğu durum için Şekil 4.2' de ve maksimum yük akımı için ise Şekil 4.3' de görülmektedir. Buradan görüldüğü gibi kablo başı akımlarında yük akımının etkisi çok fazla görülmez. Çünkü arızadan dolayı oluşan arıza akımı oldukça büyüktür. Yük akımının 0.42 kA olduğu durumda arızalı fazın kablo başı akımı 11.1659, -119684 kA aralığında iken yük akımı 0.84 kA olduğunda bu değer 11.157,-11.9674 kA aralığında olur. Buradan da görüldüğü gibi aradaki fark çok azdır. Akımın ilk yükselmesi, arıza noktasından gelen ilk dalganın vamasıyladır. Bu dalganın kablo başına varması üzerine arıza yerine doğru geri yansır. O zaman dalga tekrar arıza noktasında yansır ve dalgalar kablo başına geri döner. Bu gidiş dönüş arıza dalgasının dağılması ve sürekli hal arıza şartına ulaşınca kadar devam eder. Sonuçta kablo başı akı -lan bu dalgaların peş peşe yansımalarından oluşur.

Kablo başına ait gerilim dalga şekilleri değişmiştir. Sağlam fazlardaki salınım kablolar arasındaki karşılıklı etkilenmeden dolayıdır fakat bunlar küçük genliktir ve süratle söner. Arızalı fazda ise kablo sonu gerilimi küçük genlikli salınımlar yaparak süratle sifıra düşer (Şekil 4.2) ve Şekil 4.3).

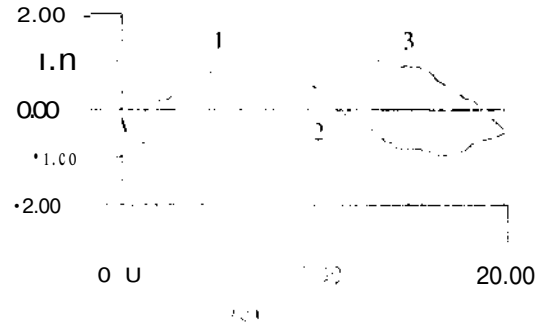
Kablo sonuna ait akımlarda ise yük akımının etkisi daha bariz bir şekilde hem salınımlarda hem de genliklerde görülmektedir (Şekil 4.4 (a) ve (b)).



(a)



(b)

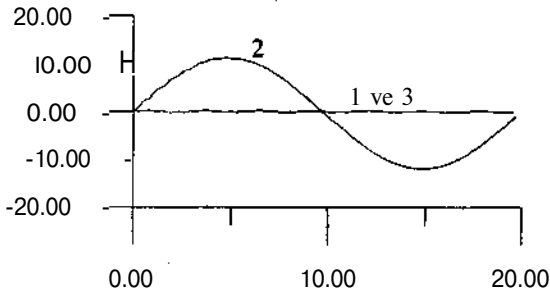


Şekil 4.2 Yuk ak'muunı, etki-' Yük akımı 0.42 kA

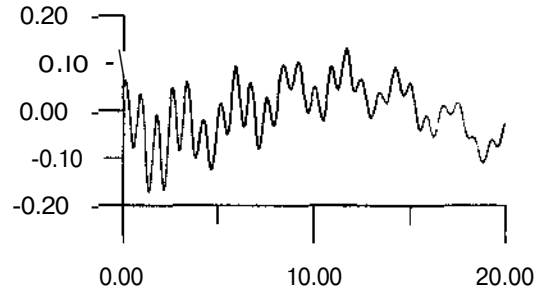
a- Kablo başı akımları

b- kablo başı gerilimleri

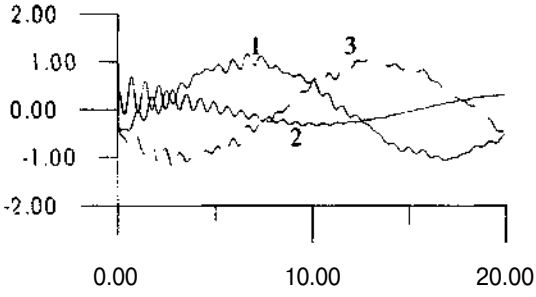
c- Arıza noktasındaki gerilimler



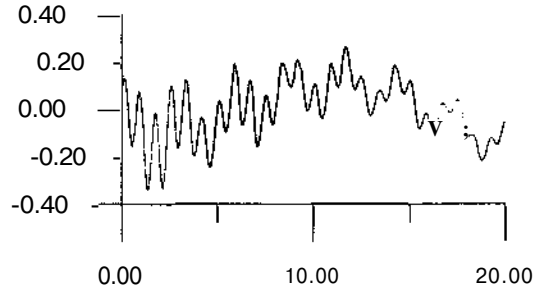
(a)



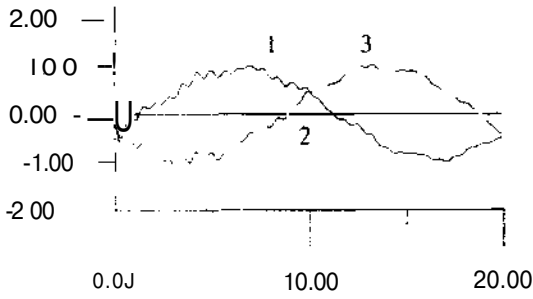
(a)



(b)



(b)



(c)

Şekil 4.3 Yük akınının etkisi: Yük akımı 0.84 kA

- a- kablo bçj. akımları
- b-KaMo bçj gerilimleri
- c- \n. .I noktası cerilimleri

Şekil 4.4 Sağlam fazlara ait kablo sonu akımları

- a- Yük akımı 0.42 kA iken
- b- Yük akımı 0.84 kA iken

#### 4. Kaynaklar

- [1] Wedepohl and Wilcox, D.J. "Transient Analysis of Underground Power Transmission Systems. System Model and Wave Propagation Characteristic", Proc.IEE, Vol. 120, 1973, pp.243-257.
- [2] Unver, U. "Transient Analysis of Cable Systems Including The Effect of Non-Linear Protective Devices", Ph. D. Thesis, UMIST. Manchester, October. 1979.
- [3] Unver U., "Enerji Nakil Hatlarının Kısa Devre Analizi: Çift Taraftan Beslenen Hatlar.", Elektrik Mühendisliği 6. Nci Ulusal Kongresi. 1995, pp. 180-196.





Arıza noktasının sağ ve sol taraflarındaki uçlarına ait gerilim ve akımlarını ifade eden matris denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{I}}'_s \\ \tilde{\mathbf{I}}'_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 + \mathbf{Y}_s & -\mathbf{B}_s \\ -\mathbf{B}_s & \mathbf{A}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{V}}'_s \\ \tilde{\mathbf{V}}'_F \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{I}}'_2 \\ \tilde{\mathbf{I}}'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2 & -\mathbf{B}_2 \\ -\mathbf{B}_2 & \mathbf{A}_2 + \mathbf{Y}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{V}}'_2 \\ \tilde{\mathbf{V}}'_y \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Burada  $\mathbf{A}_1$  ve  $\mathbf{B}_1$  sol tarafa ait alt matrisleri ve  $\mathbf{A}_2$  ve  $\mathbf{B}_2$  ise sağ tarafa ait alt matrislerdir yani;

$$|\mathbf{A}| = Y_0 \cdot \coth(x/y), \quad |\mathbf{B}| = Y_0 \cdot \operatorname{cosech}(x/y),$$

$$\mathbf{A}_2 = Y_0 \cdot \coth(y/(l-x)), \quad \mathbf{B}_2 = Y_0 \cdot \operatorname{cosech}(y/(l-x))$$

$y$  = kablunun propagasyon katsayısı

$l$  = toplam kablo uzunluğu

$x$  = arıza noktasının 1.inci baraya olan uzaklığı

$\mathbf{Y}_s$  kaynağa ait admitans matrisi ve  $\mathbf{Y}_y$ , yüke ait admitans matrisleridir. Arıza noktasına Kirchof'un akım kanunu uygulandığında Şekil 2.1'den;

$$\mathbf{I}'_s + \mathbf{I}'_l - \mathbf{I}'_F = \mathbf{0} \quad (2.6)$$

yazılır. Burada;

$$\tilde{\mathbf{I}}'_2 = \mathbf{Y}_F \cdot \tilde{\mathbf{V}}'_F; \quad \tilde{\mathbf{I}}'_y = -\mathbf{Y}_F \cdot \tilde{\mathbf{V}}'_F \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir ve  $\mathbf{Y}_F$ , arıza admitans matrisidir.  $\tilde{\mathbf{V}}'_F$ , arıza noktasında arıza öncesi işletme gerilimlerinin gerilim vektörüdür.  $\tilde{\mathbf{V}}'_s$ , arıza noktasına uygulanan temsili kaynağa ait gerilim vektörüdür.

Denklem (2.4), (2.5) ve (2.6) birleştirildiğinde komple sistemin ifadesi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{I}}'_s \\ \tilde{\mathbf{I}}'_F \\ \tilde{\mathbf{I}}'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 + \mathbf{Y}_s & -\mathbf{B}_s & 0 \\ -\mathbf{B}_s & \mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2 - \mathbf{Y}_1 & -\mathbf{B}_2 \\ 0 & -\mathbf{B}_2 & \mathbf{A}_2 + \mathbf{Y}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{V}}'_s \\ \tilde{\mathbf{V}}'_F \\ \tilde{\mathbf{V}}'_y \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Sınır şartları dikkate alınacak (2.8) denklemi çözümlerse;

$$\tilde{\mathbf{V}}'_F = \begin{bmatrix} -\mathbf{B}_1(\mathbf{A}_1 + \mathbf{Y}_s)^{-1} \mathbf{B}_1 + (\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \mathbf{Y}_F) \\ -\mathbf{B}_2(\mathbf{A}_2 + \mathbf{Y}_y)^{-1} \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}^{-1} \tilde{\mathbf{I}}'_F \quad (2.9)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $\tilde{\mathbf{I}}'_F$ , denk (2,7) de yazıldığından;

$$\tilde{\mathbf{V}}'_s = (\mathbf{A}_1 + \mathbf{Y}_s)^{-1} \mathbf{B}_1 \cdot \tilde{\mathbf{V}}'_F \quad (2.10)$$

$$\tilde{\mathbf{V}}'_y = (\mathbf{A}_2 + \mathbf{Y}_y)^{-1} \mathbf{B}_2 \cdot \tilde{\mathbf{V}}'_F \quad (2.11)$$

yazılır. Burada  $\tilde{\mathbf{V}}'_F$  denk (2.9)'da verilmiştir. Temsili kaynaktan dolayı oluşan akımlar;

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{I}}'_s &= -\mathbf{Y}_s \tilde{\mathbf{V}}'_s \\ \tilde{\mathbf{I}}'_y &= -\mathbf{Y}_y \tilde{\mathbf{V}}'_y \end{aligned} \quad (2.12)$$

dir. Şekil 2.1'den görüldüğü gibi;

$\tilde{\mathbf{V}}'_s = \tilde{\mathbf{V}}'_s$  ve  $\tilde{\mathbf{V}}'_y = \tilde{\mathbf{V}}'_y$  dir. Böylece  $\tilde{\mathbf{I}}'_s$  ve  $\tilde{\mathbf{I}}'_y$ , denklem (2.12)'de  $\tilde{\mathbf{V}}'_s$  ve  $\tilde{\mathbf{V}}'_y$  yerine  $\tilde{\mathbf{V}}'_s$  ve  $\tilde{\mathbf{V}}'_y$  konularak ifade edilir.  $\tilde{\mathbf{V}}'_s$  ve  $\tilde{\mathbf{V}}'_y$ , denklem (2.10) ve denklem (2.11)'de ifade edilmiştir.

Sonuçta elde edilen cevap akımları, temsili kaynağın uygulanmasıyla elde edilen akımları ve arıza öncesi sistemden akan yük akımının toplamıdır. Sonuç gerilimleri ise arıza öncesindeki sürekli hal gerilimleri ve arıza anında sisteme uygulanan hayali kaynağın etkisiyle meydana gelen gerilimlerin toplamıdır;

$$\tilde{\mathbf{V}}'_s = (\tilde{\mathbf{V}}'_s)_B + \tilde{\mathbf{V}}'_s, \quad (2.13)$$

$$\tilde{\mathbf{V}}'_y = (\tilde{\mathbf{V}}'_y)_{ss} + \tilde{\mathbf{V}}'_y \quad (2.14)$$

Aynı şekilde arızalı noktaya ait gerilimler de aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\tilde{V}_F = (\tilde{V}_F)_{SS} + \tilde{V}'_F \quad (2.15)$$

$\tilde{V}_F$ , arızalı noktanın sonuç gerilim vektörüdür.  $(\tilde{V}_F)_{SS}$ , sürekli hal gerilimi ve  $\tilde{V}'_F$ , arıza anındaki temsili kaynaktan dolayı oluşan gerilim değeridir.

Frekans domeninde elde edilen bu değerler, Fourier Dönüşüm Yöntemiyle zaman domeninde elde edilir [3].

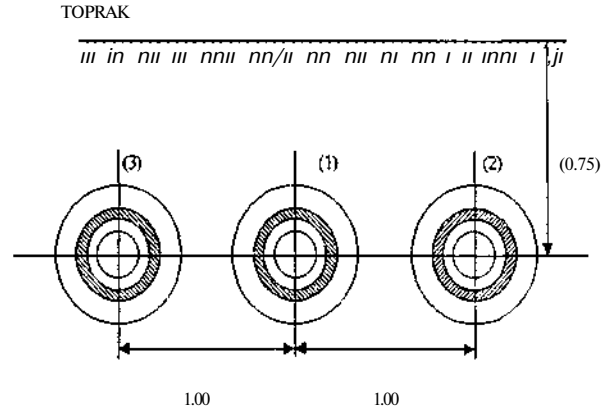
#### Uygulama Çalışmaları ve Sonuçlar

Uygulamada 2XS(FL)2YX1X1000 RMF 89/154 Kv tipi tek çekirdekli bir kablo kullanılmış olup kabloya ait değerler Tablo 1' de verilmiştir. Sistem 154 kV luk olup kablo uzunluğu 30 km' dir. Arıza kablonun 15.inci km' sinde meydana gelmiştir ve arıza esnasında yük akımı 0' dır.

Kabloların toprak altında yerleşimi Şekil 3.1' de gösterilmiş olup ölçüler metre cinsindedir.

TABLO 1. Kullanılan Kablonun Karakteristik Değerleri

Çekirdek Yarıçapı: 1.55 cm
Kılıfın İç Yarıçapı: 4.1 cm
Kılıfın Dış Yarıçapı: 4.55 cm
Kablo Dış Yarıçapı: 5.00 cm
Çekirdeğin Özdirenci: $1.71 \cdot 10^{18}$ ohm-m
Kılıfın Özdirenci: $3.58 \cdot 10^{18}$ ohm-m
Ana İzolasyonun Bağıl Dielektrik Sabiti: 4.2
Çekirdek İzolasyonunun Bağıl Dielektrik Sabiti: 2.4
Çekirdeğin Geçirgenlik Katsayısı: 1.0
Kılıfın Geçirgenlik Katsayısı: 1.0



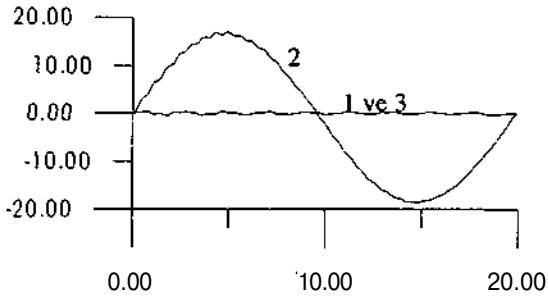
Şekil 3.1 Kablo Sisteminin Konumu

Değişik kaynak empedanslarıyla yapılan çalışmalarda kaynak empedansının etkisi daha çok arızalı faza ait kablo başı akımlarının genliğinin artması şeklinde görülür. Kaynak indüktansının azalmasıyla kablo başı akımlarının maksimum değerleri artar. Kaynak indüktansı  $L_s = 0.012$  H iken arızalı noktaya ait kablo başı arıza akımı 16.91 kA iken bu değer  $L_s = 0.048$  H iken 6.77 kA' e düşer. Bunun sebebi arıza esnasında akım akışının kablo devresinin empedansı ile sınırlanmasıdır. Sağlam fazlarda ise kaynak indüktansının değeri azaldıkça salınımların arttığı gözlenmiştir (Şekil 3.2(a), ve 3.3 (a))

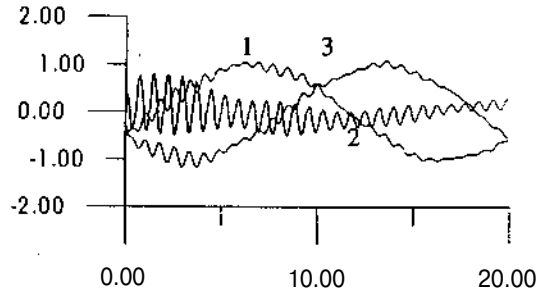
Kaynak indüktansı arttığında kablo başına ait gerilimlerde oluşan salınımların genliği (özellikle arızalı fazın gerilimlerinde) azalır. Maksimum gerilim büyüklüğünde önemsiz değişimler görülür (Şekil 3.2(b), ve 3.3 (b)).

Arıza noktasında ise yine aynı durum görülür. Yani kaynak indüktansının değeri arttıkça salınımlarda azalmalar görülmüştür (Şekil 3.2 (c), ve 3.3 (c)).

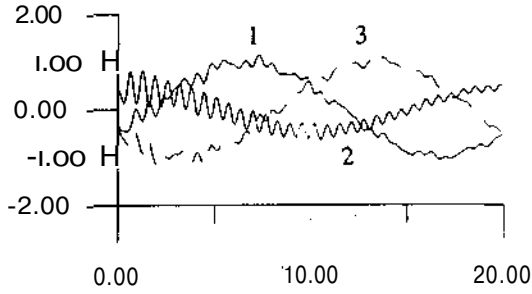
Kaynak indüktansına seri bağlı direncin etkisi, akımın büyüklüğünü azaltmaktır. Kaynak direnci artınca kablo başına ait akımın maksimum değeri azalır. Şekillerde 1 ve 3 No' lu eğriler sağlam fazlara 2 No' lu eğri ise arızalı fa/a aittir



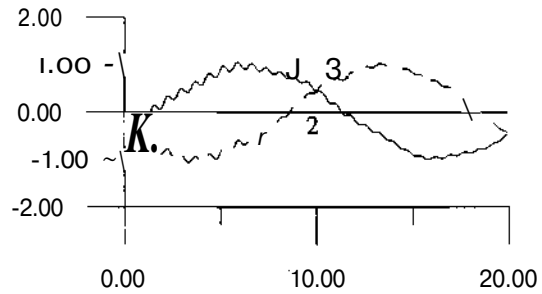
(a)



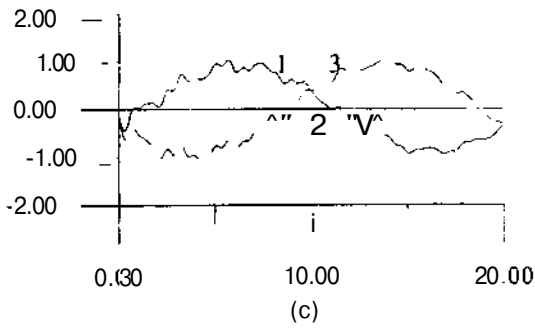
(b)



(b)

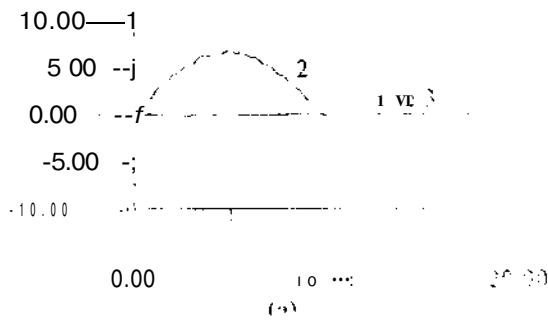


(c)



Şekil 3.2 Tek Faz Toprak Arızasında Kaynak Empedansının Etkisi:  $L=0.012H$  iken

- a-  $L=0.012$  iken kablo başı akımları  
b-  $L=0.012$  iken kablo başı gerilimleri  
c-  $L=0.012$  iken arıza noktası gerilimleri



(a)

Şekil 3.3 Tek Faz Toprak Arızasında Kaynak Empedansının Etkisi:  $L=0.012H$  iken

- a-  $L=0.048$  iken kablo başı akımları  
b-  $L=0.048$  iken kablo başı gerilimleri  
c-  $L=0.048$  iken arıza noktası gerilimleri

#### 4. Kaynaklar

- [1] Wedepohl and Wilcox, D.J. "Transient Analysis of Underground Power Transmission Systems. System Model and Wave Propagation Characteristic". Proc.IEE, Vol. 120, 1973, pp.243-257.
- [2] Unver, U. "Transient Analysis of Cable Systems Including The Effect of Non-Linear Protective Devices", Ph. D. Thesis, UMIST, Manchester, October, 1979.
- [3] Unver U., "Enerji Nakil Hatlarının Kısa Devre Analizi: Çift Taraftan Beslenen Hatlar.", Elektrik Mühendisliği 6. Nci Ulusal Kongresi, 1995. pp. 180-196.

# ENERJİ İLETİM HATLARINDA ASENKRON ÇALIŞMADA OLUŞAN YÜKSEK GERİLİMİN HESAPLANMASI İÇİN SAYISAL HESAPLAMA METODU

Arif HAŞİMOV, Yevgeni DM ITRİ EV  
İlimler Akademisi  
Hüseyn CAVİD prospekti 33  
Baku / Azerbaycan

Ahmet NAYIR  
Qafqaz Üniversitesi  
Neriman NERİMANOV prospekti 103  
Baku / Azerbaycan

## ABSTRACT

// is important to provitle economic norking of energy transjer lines /rom inlemeli över volinde uılhou accii/em. The »inin Constnclive of Paramelers of economic distrihution stalions, ihe Cost of the First Constriktion and \orking of the Compound Svsieim <>f energy iransmission lines tire nesessetry in solviny, thıs problem. One of the problems of energy transnission lines is to be defeneded from asenkron \orked över vottage. İn thi.s anide the över vottage of ener&y transnission lines investigaied.

## ÇİRİŞ

Enerji iletim hatlarının iç aşırı gerilimlerden korunarak kazasız ekonomik çalışmasını sağlamak önemlidir. Çok yüksek gerilimli enerji iletim hatlarında en ciddi kazalardan biri de asenkron çalışma rejimidir. Asenkron çalışma rejimi; sistemi paralel çalışmaya non senkron bağlayınca ve ya elektrik iletiminin dayanıklılığı bozulduğunda oluşur. Enerji iletim hattı açıldığında asenkron rejim ortadan kaldırıldığı zaman çok yüksek tepe değerli aşırı gerilim oluşabilir. Asenkron çalışma rejiminde oluşan aşırı gerilimin öğrenilmesi; Enerji iletim hatlarının izolasyonu ve aşırı gerilimlerden korunarak muhafazası için önemlidir. Enerji iletim hatlarında asenkron çalışma rejimi ortadan kaldırıldığı vakit aşırı gerilimi öğrenmek için Türkiye Azerbaycan arasında kurulması düşünülen (Şekil-1) CIJ gösterilen sistem

1H knmişiiir.

1. Düğüm noktası için :

$$\frac{di_{1,t}}{dt} = L_k [e_1(t) - r i_{1,t} - u_{1,t}];$$

$$e_1(t) = E_m \cdot \sin(\omega t + \delta_1);$$

$$u_{1,t} = L \cdot \frac{di_{1,t}}{dt};$$

$$i_{1,t} = i_t - i - i_{1,t};$$

$$i_{1,t} = f(u_{1,t});$$

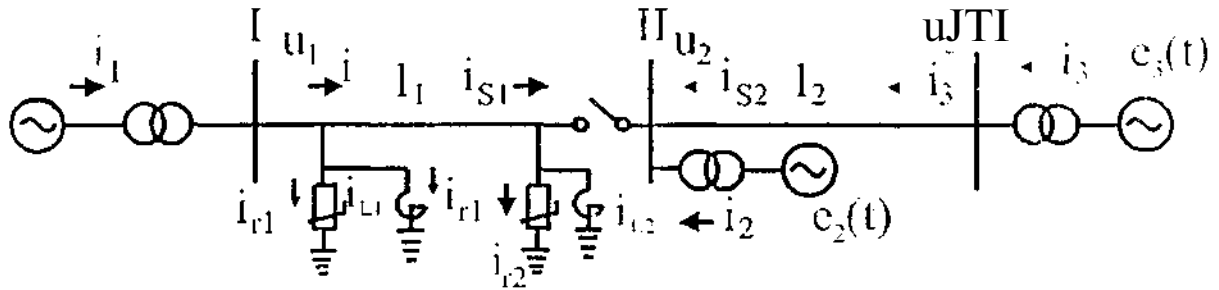
$$-u_{1,t} + (z + z_n) i_{1,t} = v_{1,t};$$

$$v_{1,t} = -u_{1,t} + z i_{1,t} - h z \left[ \sum_{k=1}^n \langle i_k(\pm u_{1,t}) + u_{1,t} \left( 1 - \frac{u_{1,t}}{|u_{1,t}|} \right) + \sum_{k=1}^n \langle i_k \right] + \sum_{k=1}^n z_k \cdot x_k \cdot i_{1,t};$$

$$i_{1,t} = f(u_{1,t}) \text{ ve ya } u_{1,t} = \varphi(i_{1,t});$$

$$i_{1,t} = \sum_{k=1}^n a_k \cdot u_{1,t}^{-1};$$

$$1 / , + \langle , + \dots + \langle , = /$$



Şekil 1. Asenkron <,•• dışımı modeli

III. Dügüm noktası için.

$$\frac{di_3}{dt} = L_{r3} [e_3(t) - r_3 i_3 - u_3]$$

$$i_3 = i_{q2}; \quad u_3 + (r + r_3) i_3 = v_{q2}$$

$$u_3 = v_{q2} - (r + Z_3) i_3$$

$$v_{q2} = -u_{q2} + Z_{q2} + h_2 \left[ \sum_{k=1}^n G_k (\pm u_3) + u_F \left( 1 - \frac{u_3}{|U_F|} \right) + \sum_{k=1}^n X_k \cdot i_k \right]$$

$$+ \sum_{k=1}^n Z_k \cdot X_k \cdot i_{fk}$$

Enerji iletim hatlarının orta noktalarındaki akım ve gerilimleri hesaplamak için aşağıdaki formüllerden faydalanılır. [1]

$$\begin{aligned} \left( 1 + hZ \sum_{k=1}^n G_k \right) u_d + (Z + Z_s) i_d &= V_p \\ - \left( 1 + hZ \sum_{k=1}^n G_k \right) u_d + (Z + Z_s) i_d &= V_q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_p &= u_r + Z_r i_r + hZ \left[ \sum_{k=1}^n G_k (\pm u_r) + u_F \left( 1 - \frac{u_r}{|U_F|} \right) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^n X_k \cdot i_k \right] + \sum_{k=1}^n Z_k \cdot X_k \cdot i_{fk} \\ v_q &= -u_q + Z_i i_q - hZ \left[ \sum_{k=1}^n G_k (\pm u_q) + u_F \left( 1 - \frac{u_q}{|U_F|} \right) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^n X_k \cdot i_k \right] + \sum_{k=1}^n Z_k \cdot X_k \cdot i_{fk} \end{aligned}$$

### SONUÇ

Tckliil' olunan matematik model lüerji iletim hatlarında iisenkron çalışma rejiminde dolaylı açılma anındaki aşırı gerilimin yüksek dakiklikle hesaplanmasına imkan veriyor. İlininci Faz açıldıktan sonra öbür Fazların açılması ta/lardan akan akımların sıfırdan geçine /amanlanı nıda oluşsun. Aşırı gerilim hesaplandığı zaman komütasya olunan hattı besleyen kaynakların elektrik hareket kuvvetleri arasındaki açının maksimum değeri 18ü" ye eşit alınır. Kaynağın geriliminin maksimum değeri ise (1.2 - 1.3) U<sub>F</sub> Faz gerilimine beraber alınır. Birinci hesaptan alman açılmadan aşırı gerilimin ma\iniim değeri > ak kısık olarak 2.2 U<sub>F</sub> olur.

Alınan sonuçlardan sonra Azerbaycan ve Türkiye Enerji iletim hattında asenkron rejimde (alışmadan dolayı açılma olursa, oluşan aşırı gerilimin karşısını almak için hattın ortasında şöntleyici reaktör ve parafudur bağlanmalıdır.

### KAYNAKÇA

- [1] HAŞIMOV A. M. - NAYIR A. "Enerji İletim Hatlarında Dalga proseslerinin Araştırılmasında Deri Olayı ve Kurona Etkisinin Dikkate Alınması" Yıldız Teknik Üniversitesi dergisi 1998/2 - s-37-46

# ENERJİ İLETİM HATLARINDA MANEVRA AŞIRI GERİLİMLERİNİN ANALİZİ

Nuri SEZER  
Türkiye Vagon Sanayi A.Ş.  
Araştırma-Geliştirme Dairesi  
54198 Sakarya

M. Uğur ÜNVER  
Sakarya Üniversitesi  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
54040 Sakarya  
E-mail: unver@esentepe.sau.edu.tr

## ABSTRACT

*in this study, transient overvoltages due to energisation conditions on a 380 kV overhead transmission line are analysed. The effects of line length and source impedance on energisation transients are investigated using digital computer under simultaneous energisation conditions. Sending-end and receiving-end transient voltage curves are obtained for different conditions.*

## 1. GİRİŞ

Çok yüksek gerilimli iletim hatlarında manevra aşırı gerilimlerinin, yıldırım aşırı gerilimlerine göre daha büyük önem taşıması, izolasyon koordinasyonu açısından bu gerilimlerin hattın tasarımı aşamasında hesaplanmasını zorunlu kılmaktadır. Zira iletim hattının ve kesicilerin izolasyon seviyelerini belirleyecek olan açma kapama aşırı gerilimlerinde, 0.2 p.u.'lık bir azalma ekonomik kazanımlar sağlayabilmektedir [1,2,3].

Manevra aşırı gerilimlerinin hesaplanmasında, analitik metodlardan, zaman bölgesinde çözüm sağlayan 'Laftice Diagram' ve frekans bölgesinde çözümü elde etme sonra, zaman bölgesinde çözümü veren 'Fourier Dönüşümü' teknikleri günümüzde en fazla kullanılan yöntemlerdendir [4,5].

Bu çalışmada üç adet faz iletkeni ve bir adet koruma iletkeninden meydana gelen 380 kV luk bir enerji iletim hattı esas alınıp bilgisayar ortamında Fourier dönüşüm tekniği kullanılarak, hat sonu boşta olduğu durumlar için hat uzunluğunun ve kaynak endüktansının hat üzerinde oluşabilecek kapama aşırı gerilimlerine olan etkileri araştırılmıştır.

## 2. ENERJİ İLETİM HATTININ ANALİZİ

Geçici hal problemlerinin çözümünde zaman domenine göre avantajlarından dolayı, sürekli hal çözümleri öncelikle frekans domeninde elde edilir. Uzun, homojen, çok fazlı bir iletim hattının, hat başından x mesafe uzaklıktaki bir noktadaki akım ve gerilim için frekans domeninde aşağıdaki ifadeler verilir.

$$\frac{dV}{dx} = -ZI \quad (D)$$

$$\frac{dI}{dx} = -YV \quad (2)$$

Burada, Z ve Y hattın empedans ve admitans matrisleridir. Denklem (1) ve (2) den faydalanarak aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir.

$$\frac{d^2 I}{dx^2} + ZYV = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 V}{dx^2} + ZYI = 0 \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitliklerde verilen diferansiyel denklemlerin çözümü, başlangıç koşulları göz önüne alınarak hat başı ve hat sonu akım ve gerilimleri  $x = 0$  için matrisel biçimde aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada A ve B alt matrisleri 3x3 boyutunda olup aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$A = F_o \cdot \cotgh(y/l) \quad B = r_o \cdot \text{cosech}(y/l)$$

Denklem (5)'ten faydalanarak, hat sonu açık devre ( $I_R=0$ ) iken, hat başı ifadelerine bağlı olarak hat sonu gerilimi  $V_R$  hesaplanabilir:

$$V_R = F^{-1} \cdot I_S \quad (6)$$

Burada,

$$F = A \cdot B^{-1} \cdot A - B \quad \text{dir}$$

### 2.1. Kaynak Empedansının Ele Alınması

Şekil 1. de tek hâl şen)8sı verilen iletim hattının gönderici ucundaki kaynak. Şekil 2. 'de Norton eşdeğer devresi ile temsil edilmektedir. Burada  $E_s$  kaynak gerilimi,  $X_s$  kaynak reaktansı,  $I_s$  kaynak ekimi.  $Y_s$  kaynak admitansdır.

Burada,  $L_h, r_h, L_t$ , bloğun ve reaktörün parametreleridir

$$L_h = \begin{bmatrix} L_T + \frac{2}{3}L_x & -\frac{1}{3}L_x & -\frac{1}{3}L_x \\ -\frac{1}{3}L_x & L_T + \frac{2}{3}L_x & -\frac{1}{3}L_x \\ -\frac{1}{3}L_x & -\frac{1}{3}L_x & L_T + \frac{2}{3}L_x \end{bmatrix};$$

$$r_h = \begin{bmatrix} r_T + \frac{2}{3}r_x & / & / \\ -\frac{1}{3}r_x & r_x + \frac{2}{3}r_x & -\frac{1}{3}r_x \\ -\frac{1}{3}r_x & / & r_x + \frac{2}{3}r_x \end{bmatrix};$$

Buradaki  $L, L_g, r, r_g$  generatör ve transformatörün parametreleridir. Fazla açılmağa başladığında transformatörün magnetlenme eğrisini dikkate almak lazım gelir ki, o zaman aşağıdaki denklemlerden ilave istifade edilir. Formüldeki değişkenler aşağıdaki gibi matrisdir.

$$i_t = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \quad i_r = \begin{bmatrix} i_{rA} \\ i_{rB} \\ i_{rC} \end{bmatrix}; \quad i_s = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix};$$

$$u_c = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}; \quad \psi_{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_{q1} \\ \psi_{qB} \\ \psi_{qC} \end{bmatrix};$$

... EĞER 5 transformatörünün manetik akımını dikkate alsak 1. düğüm noktasının denklemleri aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{q1} \\ \psi_{qB} \\ \psi_{qC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{T1} \frac{d}{dt} (\psi_{q1}) + L_{T2} \frac{d}{dt} (\psi_{qB}) - \frac{1}{3} L_{T3} \frac{d}{dt} (\psi_{qC}) \\ -\frac{1}{3} L_{T1} \frac{d}{dt} (\psi_{q1}) - L_{T2} \frac{d}{dt} (\psi_{qB}) + L_{T3} \frac{d}{dt} (\psi_{qC}) \\ -\frac{1}{3} L_{T1} \frac{d}{dt} (\psi_{q1}) - \frac{1}{3} L_{T2} \frac{d}{dt} (\psi_{qB}) + L_{T3} \frac{d}{dt} (\psi_{qC}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{c1} \\ u_{c2} \\ u_{c3} \end{bmatrix};$$

$$\frac{di_{cA}}{dt} = L_{h1}^{-1} \left( \frac{d\psi_{q1}}{dt} - u_{c1} \right)$$

$$\frac{di_{cB}}{dt} = L_{h2}^{-1} \left( \frac{d\psi_{q2}}{dt} - u_{c2} \right)$$

$$\frac{di_{cC}}{dt} = L_{h3}^{-1} \left( \frac{d\psi_{q3}}{dt} - u_{c3} \right)$$

Manyetizma akımının yaklaşık ifadesi aşağıda verilecektir. Aynı zamanda  $f(y)$  de uygun

$$f(y) = a + nbif + HICI$$

ifadesi alınacaktır, burada  $n=9, m=1$ .

II. Düğüm noktası için.

$$\frac{di_s}{dt} = L_{t2}^{-1} [e_s(t) - r_s i_s - u_s];$$

$$e_s = L_{t2}^{-1} [v_{p1}]; \quad i_s = f(u_s);$$

$$u_2 + (Z + Z_s) i_{k1} = v_{p1};$$

$$i_{k1} = (Z + Z_s)^{-1} v_{p1} - (Z + Z_s)^{-1} \cdot u_2;$$

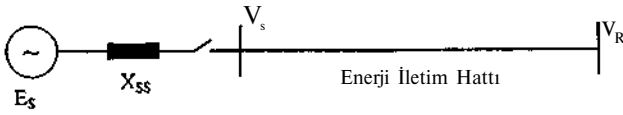
$$u_2 + (Z + Z_s) i_{k2} = v_{p2};$$

$$i_{k2} = (Z + Z_s)^{-1} v_{p2} - (Z + Z_s)^{-1} \cdot u_2;$$

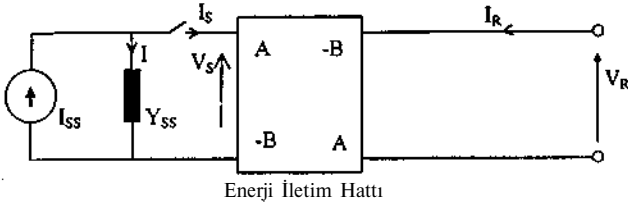
$$i_2 + (Z + Z_s)^{-1} \cdot v_{p1} - (Z + Z_s)^{-1} \cdot u_2 +$$

$$(Z + Z_s)^{-1} v_{p2} - (Z + Z_s)^{-1} \cdot u_2 = i_{r2} + i_{L2};$$

$$u_2 = 0.5(Z + Z_s) [i_2 - i_{r2} - i_{L2} + (Z + Z_s)^{-1} (v_{p1} + v_{p2})];$$



Şekil 1. Enerji iletim hattı tek hat şeması



Şekil 2. Hat başındaki kaynağın Norton eşdeğer devresi ile gösterilişi

Şekil 2.'de yer alan devre kesicisi kapandığında Norton eşdeğer devresi üzerinde Kirchoff'un akım yasası uygulanırsa,

$$I_{SS} = I_S + I \quad (7)$$

yazılır. Burada,

$I = Y_{SS} \cdot V_S$  olduğundan, Denklem (5)'teki  $I_S$  ifadesi, denklem (7)'de yerine konarak düzenlendiğinde,

$$I_{SS} = (A + Y_{SS}) \cdot V_S - B \cdot V_R \quad (8)$$

elde edilir. Bu ifade ile Denklem (5)'te yer alan matris ifadesi düzenlenerek,

$$\begin{bmatrix} I_{SS} \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A + Y_{SS}) & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix} \quad (9)$$

biçiminde ifade edilebilir. Hat sonu boşta ( $I_R=0$ ) olduğu durumda, Denklem (9)'dan,

$$V_S = B^{-1} \cdot A \cdot V_R \quad (10)$$

elde edilir. Bu ifade Denklem (9)'da yerine konarak hat sonu gerilimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_R = G^{-1} \cdot I_{SS} \quad (11)$$

Burada,

$G = (A + Y_{SS}) - B^{-1} \cdot A - B$  dir. Böylece kaynak parametrelerini içeren, hat başı ve hat sonu gerilim ifadeleri frekans domeninde elde edilmiş olur.

### 3. UYGULAMA ÇALIŞMALARI

Uygulama çalışmalarının yapıldığı enerji iletim sisteminin, hat gerilimi 380 kV işletme frekansı 50 Hz' tir. Şekil 3. de görüldüğü gibi iletim sisteminde her faz hattı için dört adet örgülü iletkenlerden oluşan demet iletkenler ve toprak iletkeni

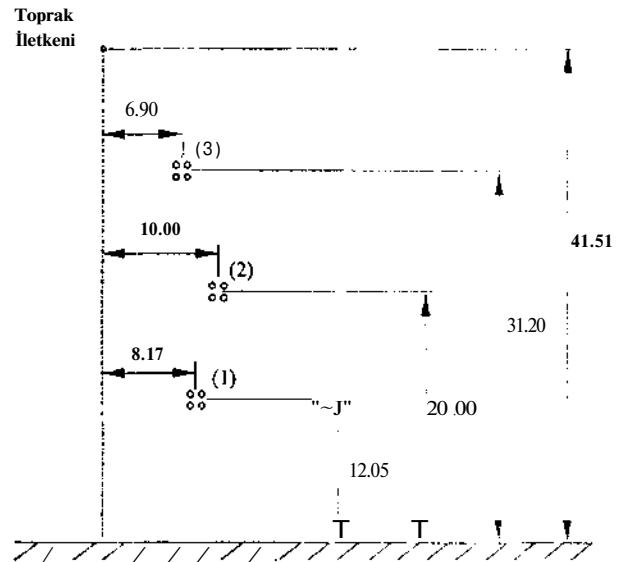
yer almaktadır. İletim hattına ait detay bilgiler Tablo 1. de verilmiştir.

Manevra aşırı gerilimlerinin hesaplanmasında hat sonu açık devre olduğu ve kesici kutuplarının eşzamanlı kapandığı kabulü ile hat başı ve hat sonu gerilimleri hesaplanmıştır. Hat uzunluğu ve kaynak empedansı gibi değişik sistem parametrelerinin aşırı gerilimlere olan etkileri incelenmiştir.

Tablo 1. Uygulama çalışması yapılan iletim hattına ait Özellikler

	Faz İletkeni	Toprak İletkeni
Etkin iletken çapı (cm)	30,902	2,858
<b>Damar çapı (cm)</b>	0,318	0,318
<b>İletkenlik (ohm-m)</b>	$3,21 \times 10^{-8}$	$3,21 \times 10^{-8}$
Dış yüzeydeki damar sayısı	24	24
Etkin damar sayısı	54	54
Endüktans düzeltme faktörü	0,21088	0,21088
Faz başına iletken sayısı	4	
Toprak iletkeni sayısı	1	

Toprak öz direnci 30 ohm-m olarak alınmıştır.



Şekil 3. İletim hattının profili (meşaleler metre cinsindedir)

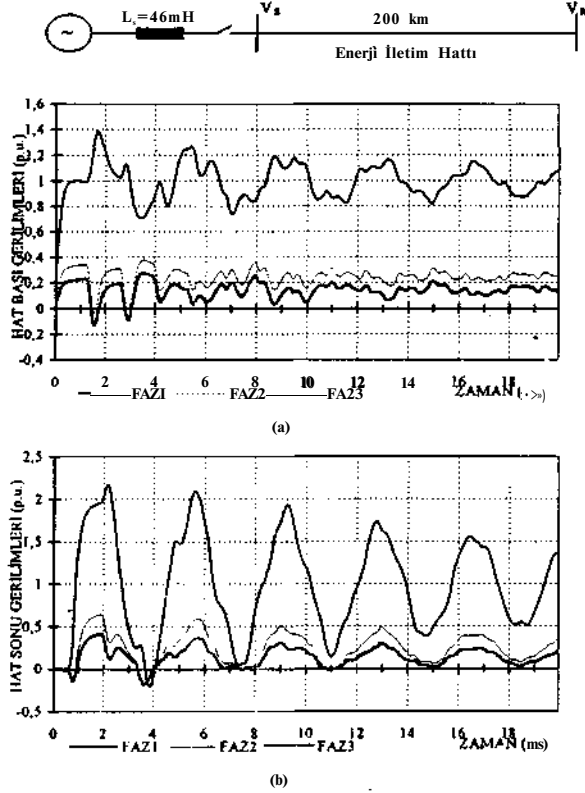
#### 3.1. Bir Faza Birim Basamak Enerji Verilmesi

Üç fazlı enerji iletim hatlarında tek faz kapama durumu pratik bir çalışma olmamakta bittir. bir fazla enerji verildiği kabulü ile yapılan hesaplamalar ile Kızlar arasındaki kuplaj etkisi gözlemlenmektedir. Bu çalışmada birinci faza 1 p.u. basamak gerilim uygulanarak sistem enerjilendirilmiş ve her fazın hat başı ve hat sonu gerilimlerinin değişimi senin ve sonsuz kaynaklar için iki durumda incelenmiştir. Sonlu kaynak için kaynak endüktansı  $L_s = 0.46$  H, sonsuz Kaynak durumu için  $R_s = 10^{-8}$  ohm olarak alınmıştır. Hat uzunluğu 200 km.



gözlem süresi 20 ms alınıp hat üzerinde şönt reaktör bulunmadığı varsayılmıştır.

Sonlu kaynak ile besleme durumu için hat başı ve hat sonu gerilimleri Şekil 4.' te, her iki çalışmada elde edilen maksimum aşırı gerilim değerleri Tablo 2.' de verilmiştir.



Şekil 4. Sonlu kaynağın 1. fazından 1 p.u. değerinde basamak gerilimi verilmesi durumu  
(a) Hat başı gerilimleri  
(b) Hat sonu gerilimleri

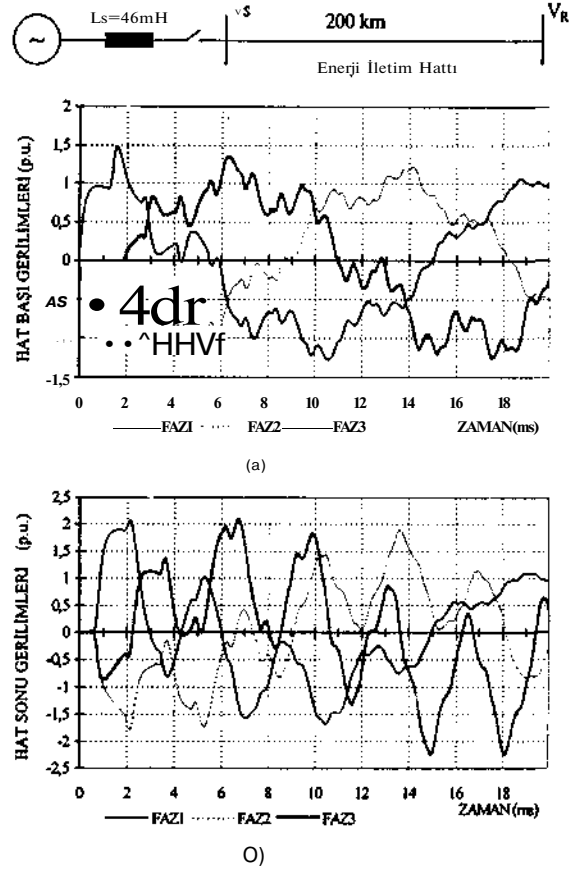
Tablo 2. Tek faza birim basamak gerilimi uygulanması halinde maksimum hat sonu gerilimleri

	Max. hat sonu gerilimleri ( p.u. )		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3
Sonlu kaynak	2,177	0,643	0,419
Sonsuz kaynak	2.067	0,654	0,429

### 3.2. Hat Uzunluğunun Etkisi

Hat uzunluğuna bağlı olarak geçici gerilimlerdeki değişimin gözlenmesi amacıyla farklı uzunluktaki hatlar için uygulama çalışması yapılmıştır. Üç fazın aynı anda enerjilenmesi durumunda hat uzunluğuna bağlı olarak hat sonu aşırı gerilimlerini gözlemek amacıyla 100 km ile 400 km arasında altı farklı uzunluktaki hat üzerinde çalışma yapılmıştır. İletim hattı 0.046 H değerinde endüktansa sahip sonlu bir kaynak üzerinden Üç fazına aynı anda enerji verilmiştir. Bu çalışmalarda gözlem süresi 20 ms olarak alınmış olup, hat başı ve hat sonunda herhangi bir şönt reaktörün olmadığı varsayılmıştır

İletim hattı boyuna göre elde edilen maksimum hat sonu aşırı gerilimleri her bir faz için Tablo 3.' te verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere birinci faza ait gerilim değerleri hat boyu arttıkça azalmasına karşılık ikinci ve üçüncü faz gerilimleri artmaktadır. Hat sonu gerilimlerinin hat boyuna göre değişim eğrisi Şekil 5.' de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere gerilim dalgasının hat boyunca yol alma süresi 0,68 ms'dir.



Şekil 5. 200 km uzunluğundaki iletim hattına üç fazlı enerji verilmesi durumu  
(a) Hat başı gerilimleri  
(b) Hat sonu gerilimleri

Tablo 3. Değişik hat uzunluklarında elde edilen maksimum hat sonu gerilimleri

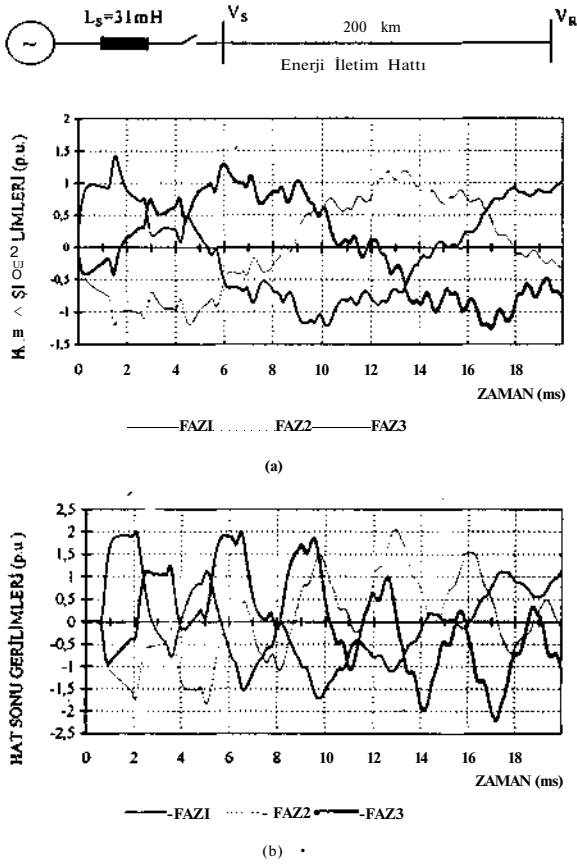
Hat Boyu ( km )	Max. hat sonu gerilimleri ( p.u. )		
	Faz1	Faz 2	Faz 3
100	2,205	1,477	2,086
150	2,137	1,460	2,194
200	2,068	1,903	2,085
250	1,980	1,995	1,979
300	1,877	2,075	1,879
400	1,871	2,148	2,083

### 3.3. Kaynak Empedansının Etkisi

Enerji iletim hattının sonlu endüktif bir kaynak ile beslenmesi durumunda, kaynak endüktansının değerine bağlı olarak hat sonu aşırı gerilimlerinin değişimi gözlemlenmiştir. Bu amaçla dört farklı değerde bara kısa

devre gücüne karşılık gelen kaynak endüktansları ele alınmıştır. Bu değerler 0,031; 0,046; 0,092; 0,230 H olup sırasıyla 15000, 10000, 5000 ve 2000 MVA bara kısa devre güçlerine tekabül etmektedirler. Hat boyu 200 km, gözlem süresi ise 20 ms olarak alınmıştır. Hat sonunda oluşan maksimum aşırı gerilimler Tablo 4.' te gösterilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi kaynak endüktansının değeri arttıkça, ya da diğer bir deyişle bara kısa devre gücü azaldıkça hat sonu aşırı gerilimleri birinci ve üçüncü fazlarda yükselmektedir.

15000 MVA bara kısa devre gücüne karşı gelen 0,031 H değerindeki kaynak endüktansı için hat başı ve hat sonu gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.' da verilmiştir. Birinci fazda hat başı gerilimi 1,44 p.u. hat sonu gerilimi ise 2,017 p.u. değerine kadar yükselmektedir. İlk 4 ms' den sonra gerilim dalgalarındaki salınımlar giderek azalmaktadır.



Şekil 6. Kaynak empedansı 0.031 H olan iletim hattına üç fazlı enerji verilmesi durumu  
(a) Hat başı gerilimleri  
(b) Hat sonu gerilimleri

Tablo4. Farklı kaynak endüktanslarına göre maksimum hat sonu gerilimleri

Kaynak endüktansı (H)	Max. hat sonu gerilimleri ( p.u. )		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3
0,031	2,017	2,060	1,981
0,046	2,068	1,903	2,085
0,092	2,104	1,338	2,152

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada 380 kV luk bir iletim hattının enerjilenmesi esnasında meydana gelen aşırı gerilimler, geliştirilmiş Fourier Dönüşüm tekniği kullanılarak, bilgisayar ortamında hesaplanmıştır. Sonuçlar hat başı ve hat sonu gerilimlerinin genlik ve dalga şekillerinin değişimini gösteren eğriler şeklinde elde edilmiştir. Öncelikle tek faz kapama çalışması yapılarak fazlar arasındaki karşılıklı etkileşim gösterilmiştir. Sistem sadece birinci fazdan enerjilenmesine karşın kuplaj etkisiyle ikinci ve üçüncü faz üzerinde de gerilimler oluşmuştur. Manevra aşırı gerilimlerinin hat uzunluğuna bağlı olarak değişimi incelenmiş ve hat uzunluğu arttıkça hat sonu aşırı gerilim seviyelerinin de yükseldiği gözlenmiştir. İletim hattının beslendiği baranın kısa devre gücünün kapama aşırı gerilimleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, farklı bara kısa devre güçlerine tekabül eden kaynak endüktansları ile çalışma yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde kaynak endüktansının değeri arttıkça yani hat başı kısa devre gücü azaldıkça, hat sonu kapama aşırı gerilimlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] SEZER, N., "Enerji İletim Hatlarında Manevra Aşırı Gerilimlerinin Analizi", Yüksek Lisans Tezi, SAÜ., Ocak 1998.
- [2] DIESENDORF, W., "Insulation Cordination in High-Voltage Electric Power Systems", Butterwoths & Co., London, 1974.
- [3] MORENO, P., DE LA ROSA, R., NAREDO, J.L., "Frequency Domain Computation of Transmission Line Closing Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No:1, January 1991.
- [4] DAY, S.J., MULLINEUX, N. REED, J.R., "Developments in obtaining transient response using Fourier Transforms. Part I: Gibbs' Phenomena and Fourier integrals ", Int. J. Elec. Eng. Educ, Vol. 3, 1965, s. 501-506.
- [5] DAY, S.J., MULLINEUX, N. REED, J.R., "Developments in obtaining transient response using Fourier Transforms. Part II: Use of the modified Fourier Transforms", Int. J. Elec. Eng. Educ, Vol. 4, 1966, s. 31-40.
- [6] ÜNVER, M.U., "Transient Analysis of Cable Systems Including the Effect of Non-Linear Protective Devices", Ph.D. Thesis, University of Manchester, Institute of Science and Technology, 1979.
- [7] BICKFORD, J.P., MULLINEUX, N., REED, J.R., "Computation of Power System Transients", Peter Peregrinus Ltd., Stevenage, England, 1976.

# POMPAYLA DOLDURMALI BİRİM İÇEREN ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE OPTİMAL AKTİF GÜÇ DAĞITIM PROBLEMİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE ÇÖZÜMÜ

Salih FADIL  
Osman Gazi Üniv. M.M.F  
Elektrik-Elektronik Bölümü  
26480, ESKİŞEHİR  
E-mail: sfadi@ogii.edu.tr

Uçman ERGÜN  
Afyon Kocatepe Üniv. Müh. Fak  
Elektrik-Elektronik Bölümü  
64300, UŞAK  
uergun@aku.edu.tr

Celal YAŞAR  
Dumlupınar Üniversitesi Müh. Fak  
Elektrik-Elektronik Bölümü  
43020, KÜTAHYA

## ABSTRACT

*This paper presents a solution method using genetic algorithm for the optimal pumped-storage unit scheduling problem in a lossy electric power system consisting of a pumped-storage and thermal units. The application of the genetic algorithm to the pumped-storage unit scheduling problem is explained in detailed manner. A simulation program in Delphi programming language was prepared according to the what is given in the paper, This program was tested on an example electric power system and it is seen that the obtained results was satisfactory.*

## 1. GİRİŞ

Pompayla doldurmalı hidrolik birimler enerji sistemlerinde enerji maliyeti ucuz iken (düşük yük değerleri) sistemde üretilebilecek olan fazladan enerjiyi hidrolik potansiyel enerji şeklinde depolamaktadır. Bu işlem alt rezervuardan üst rezervuara su pompalanarak yapılmaktadır. Daha sonra, sistemde enerji maliyeti yüksek iken (tepe yük değerlerinde) üst rezervuarda depo edilen su akıtılarak bu hidrolik potansiyel enerji elektrik enerjisine çevrilmektedir. Yapılan bu işlem sayesinde termik birimlere ait toplam yakıt maliyetinde bir azalma sağlanmaktadır. Yukarıdan anlaşılacağı gibi pompayla doldurmalı hidrolik birimlerin pompalama ve üretim olmak üzere iki çalışma modu bulunmaktadır.

Literatürde, ele alınan dağıtım problemi çeşitli yöntemlerle çözülmüştür. Pompayla doldurmalı ve batarya enerji depolama sistemlerini içeren kısa dönem kayıpsız hidrotermal koordinasyon problemi referans [1] 'de çok geçişli dinamik programlama yöntemiyle çözülmüştür. Pompayla doldurmalı birimin birden fazla şirket tarafından ortaklaşa işletilmesi durumdaki optimal dağıtım problemi referans [2] 'de yine dinamik programlama yöntemiyle çözülmüştür. Referans [3] 'de pompayla doldurmalı birim içeren sistemdeki optimal güç dağıtım problemi analitik üretim maliyet modeli kullanılarak çözülmüştür. Bu çözümde sistemdeki rassal yük değişimi ve birimlerin rassal olarak devreden çıkmaları modellenmektedir.

Genetik algoritmanın geleneksel optimizasyon ve arama tekniklerine göre avantajları; algoritmanın basitliği, problemlerin algoritmaya kolaylıkla uygulanabilmesi ve

problemlerin çözümlerinin geniş aralıklarda aranabilmesidir. Genetik algoritmanın dezavantajı ise yüksek boyutlu optimizasyon problemlerinde fazla çözüm zamanı ve bilgisayar belleğine ihtiyaç duymasındır.

Genetik algoritma enerji sistemlerinde kısa dönem kayıpsız hidrotermal dağıtım problemi [4], genel kayıpsız aktif güç dağıtım problem[5,6] gibi konulara uygulanmıştır.

Makalede pompayla doldurmalı ve termik enerji üretim birimlerinden oluşan kayıplı bir elektrik enerji sistemi gözönüne alınmaktadır. Ele alınan sistemde termik birimlere ait toplam yakıt maliyeti olası termal ve hidrolik kısıtlar altında genetik algoritma kullanılarak minimize edilmektedir

## 2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU

Ele alınan optimizasyon problemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Minimum } F_T = \sum_{j=1}^{j_{max}} \sum_{n \in N} F_n(P_{Gs,j}) t_j \quad (R) \quad (1)$$

sistemdeki elektriksel ve hidrolik kısıtlar

$$P_{yik,j} + P_{kayip,j} + P_{PH,j} - \sum_{n \in N} P_{Gs,j} = 0, \quad j \in J_{pomp} \quad (2)$$

$$P_{p,j} + P_{kayip,j} - \sum_{n \in N} P_{Gs,j} = 0, \quad j \in J_{gen} \quad (3)$$

$$P_{Gs,n}^{min} \leq P_{Gs,j} \leq P_{Gs,n}^{max}, \quad n \in N, \quad j \in J_{pomp} \quad (4)$$

$$P_{GH}^{min} \leq P_{GH,j} \leq P_{GH}^{max}, \quad j \in J_{gen} \quad (5)$$

$$F_{PH}^{min} \leq P_{PH,j} \leq F_{PH}^{max}, \quad j \in J_{pomp} \quad (6)$$

$$V_o = V^{bas}, \quad V_{j_{mu}} = V^{son} \quad (7)$$

Pompayla doldurmalı birimin rezervuanndaki başlangıç ve bitiş su seviyeleri aynı olduğundan, bu birimin net harcayacağı su nükten sıfır olmalıdır. Başka bir deyişle üretim için harcanan

<sup>1</sup> R hayali bir para birimini göstermektedir

toplam su miktarı pompalanan toplam su miktarına eşit olmalıdır.

$$QGH, TOP - \sum_{j \in J_{gen}} IPHJOP - VTOP = 0 \quad (8)$$

eşitlik (8)'de

$$IGHJOP = \sum_{j \in J_{gen}} qGH(PGH, j) t_j \quad (9)$$

$$IPHJOP = \sum_{j \in J_{pomp}} qPH(PPH, j) t_j \quad (10)$$

Yukandaki eşitliklerde,

$PGS^j > PGH^j$  - zaman periyodundaki n. termik ve pompayla doldurulmalı birimlerin üretim güçleri, ( $hdW$ ),

$F_n(PQ_{s,n}) = n$ . termik birimin / zaman periyodundaki saat başına maliyeti, ( $R/h$ ),

$t_j = /$  zaman periyodundaki saat sayısı, ( $h$ ),

$P_{yük,j} > P_{kayip,j}$  - zaman periyodundaki toplam sistem yükü (pompayla doldurulmalı birimin pompalama gücü hariç, eğer pompayla doldurulmalı birim pompalama inodunda ise) ve toplam sistem kaybı, ( $MW$ ),

$P_{GH}^{min}, P_{GH}^{max}$  termik birimin alt ve üst üretim sınırları, ( $MIV$ ),

$P_{PH}^{min}, P_{PH}^{max}$  = pompayla doldurulmalı birimin alt ve üst üretim sınırları, ( $MW$ ),

$P_{PH}^{min}, P_{PH}^{max}$  = pompayla doldurulmalı birimin alt ve üst pompalama gücü şuurları, ( $M\setminus V$ ),

$IGH^j \wedge GHj^j$  = pompayla doldurulmalı birimin j. zaman periyodundaki saat başına deşarj su miktarı, ( $acre-ft/f$ )

$qpH(PpHj)$  = pompayla doldurulmalı birimin / zaman periyodundaki saat başına pompaladığı su miktarı, ( $acre-ft/h$ ),

$-q(\wedge)^n, C^j Q^j$  = pompayla doldurulmalı birimin saat başına deşarj su miktarının alt ve üst sınırları, ( $acre-ft/h$ ),

$PH^j$  = pompayla doldurulmalı birimin saat başına j>empaiadığı su miktarının alt ve üst sınırları, ( $acre-ft/h$ ),

$V_j = j$ , zaman periyodu sonunda pompayla doldurulmalı birimin rezervuanda depolanan su miktarı, ( $acre-ft$ ),

$ymin^j \wedge ymax^j$  = pompayla doldurulmalı birimin üst rezervuandaki alt ve üst su depolama sınırları, ( $acre-ft$ ),

$qjOP^j$  = pompayla doldurulmalı birimin j>max zaman periyotlarında harcaması gerekli net su miktarı, ( $acre-ft$ ),

$QGH, TOP - IPHJOP$  = pompayla doldurulmalı birimin üretim için kullandığı toplam su miktarı ve toplam pompalan su, miktarı, ( $acre-ft$ ),

$V^{bas}, V^{son}$  = pompayla doldurulmalı birimin üst rezervuandaki sağlanması gerekli başlangıç ve bitiş su miktarları, ( $acre-ft$ ),

$N_s$  = verilen enerji sistemindeki tüm termik birimleri içeren küme,

$J_{gen} > J_{pomp}$  = pompayla doldurulmalı birimin üretim ve pompalama modlarında çalıştığı zaman periyotlarını içeren kümeler.  $J_{gen}$  ve  $J_{pomp}$  kümeleri aynı kümelerdir.

Yukarıda verilen problemin çözümü (1) de verilen maliyet fonksiyonunu (2)-(8) denklemlerinde verilen kısıtlar altında minimize eden  $P_{GS/j} \quad n \in N, j = 1, \dots, j_{max}$ ,

$PGH^j \wedge J_{gen}, PPH^j \wedge j \in J_{pomp}$  değerlerini vermektedir.

### 3. PROBLEMİN GENETİK ALGORİTMAYA UYARLANMASI

Problemin genetik algoritmaya uyarlanması aşağıda üç alt bölüm olarak açıklanmaktadır

#### 3.1 Kodlama ve Haritalama Mekanizması

Problemin bir çözümü (kromozom) tüm zaman periyodlarına ait alt dizilerin ardarda dizilmesiyle oluşturulmaktadır. Bir zaman periyoduna ait alt dizi salınım barası hariç tüm termik üretim birimlerinin güçlerinin ve pompayla doldurulmalı birime ait gücün (üretim veya pompalama) ikilik kodlanmış değerlerinin ardarda dizilmesiyle oluşturulmaktadır, n. termik birime ait kodlama ve haritalama

$$\underbrace{00\dots\dots 0}_{\ell_n} \rightarrow P_{GS/j}^{min}, \quad \underbrace{11\dots\dots 1}_{\ell_n} \rightarrow P_{GS/j}^{max} \quad (11)$$

şeklinde yapılmaktadır, n. termik birimin üretim gücüne ait ikilik kodlamadaki bit sayısı olan  $\ell_n$  istenilen çözünürlüğe göre seçilmektedir. Pompayla doldurulmalı birime ait kodlama ve haritalama

$$\underbrace{00\dots\dots 0}_{\ell_{pd}} \rightarrow P_{GH}^{min}, \quad \underbrace{01\dots\dots 1}_{\ell_{pd}} \rightarrow P_{GH}^{max} \quad (12)$$

$$\underbrace{10\dots\dots 0}_{\ell_{pd}} \rightarrow P_{PH}^{min}, \quad \underbrace{11\dots\dots 1}_{\ell_{pd}} \rightarrow P_{PH}^{max} \quad (13)$$

şeklinde yapılmaktadır. Yani pompayla doldurulmalı birim için ikilik kodlanmış büyüklük  $[0, 2^{\ell_{pd}} - 1]$  arasında ise, bu değer üretim gücü olarak alınır. Eğer bu büyüklük  $[2^{\ell_{pd}} - 1, 2^{\ell_{pd}}]$  arasında ise, bu değer pompalama gücü olarak alınır. Yine, pompayla doldurulmalı birimin gücüne ait ikilik kodlamadaki bit sayısı olan  $\ell_{pd}$  istenilen çözünürlüğe göre seçilmektedir [7]. Yukarıda anlatılan haritalama sayesinde salınım barasına bağlı olan birimin aktif üretim gücü hariç sistemdeki tüm termik birimlerin üretim güçleri ve pompayla doldurulmalı birimin üretim ve pompalama güçleri daima kendilerine ait üretim sınırları arasında kalmaktadır.

#### 3.2 Uygunluk Fonksiyonu

Sistemin bir çözümüne ait uygunluk (fitness) değeri

$$f = c_{max} - \left( \sum_{j=1}^{j_{max}} \sum_{n \in N_s} Y_n(PGS, nj) \right) + Y_{ceza} \quad (14)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte  $ceza$

$$\sum ceza = ceza_{pd} + ceza_y + ceza_v, \dots \quad (15)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada  $ceza_{pd}, ceza_y,$

<sup>2</sup> 1 acre-ft= 1233.5 m<sup>3</sup>

$ceza_{ym}$  ceza fonksiyonu\* değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$ceza_{p,sa} = \begin{cases} \sum_{j \in \{P_{sal,j} < P_{sal}^m\}} K_{sal} (P_{Gsal,j} - P_{Gsal}^m)^2 \\ \sum_{j \in \{P_{sal,j} > P_{sal}^m\}} K_{sal} (P_{Gsal,j} - P_{Gsal}^m)^2 \end{cases} \quad (16)$$

$$ceza_v = \begin{cases} \sum_{j \in \{V_j < V^{min}\}} K_v (V_j - V^{min})^2 \\ \sum_{j \in \{V_j > V^{max}\}} K_v (V_j - V^{max})^2 \end{cases} \quad (17)$$

$$ceza_{v,son} = K_{v,son} (V_{j,max} - V^{son})^2 \quad (18)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $P_{Gsal,j}$  / &  $P_{g,sa}^{TM}$  değerleri sırasıyla salınım barasırın  $j$ . periyottaki üretimi, salınım barasırın alt ve üst üretim sınırlarını göstermektedir.  $K_{sal}$ ,  $K_v$ ,  $K_{v,son}$  değerleri yukarıda verilen ceza fonksiyonlarına ait katsayıdır. Bu katsayılar verilen sisteme uygun olarak kullanıcı tarafından seçilmektedir. Eşitlik (18)'deki  $F_{son}$  periyot bitiminde hesaplanan pompayla doldunmalı birimin üst rezervuandaki su miktarıdır. Eşitlik (14)'de verilen  $c_{max}$  değeri gelen iterasyonda elde edilen en büyük

$J_{nm}$  değeri alınmaktadır. Makalede ele alınan bir minimizasyon problemi olduğu için, her bir çözüme ait uygunluk değeri (14)'e göre hesaplanmaktadır. (16) ve (17) eşitliklerindeki büyüklükler kendilerine ait sınırlar arasında ise, bu büyüklüklere ait ceza fonksiyonları sıfır olmaktadır.

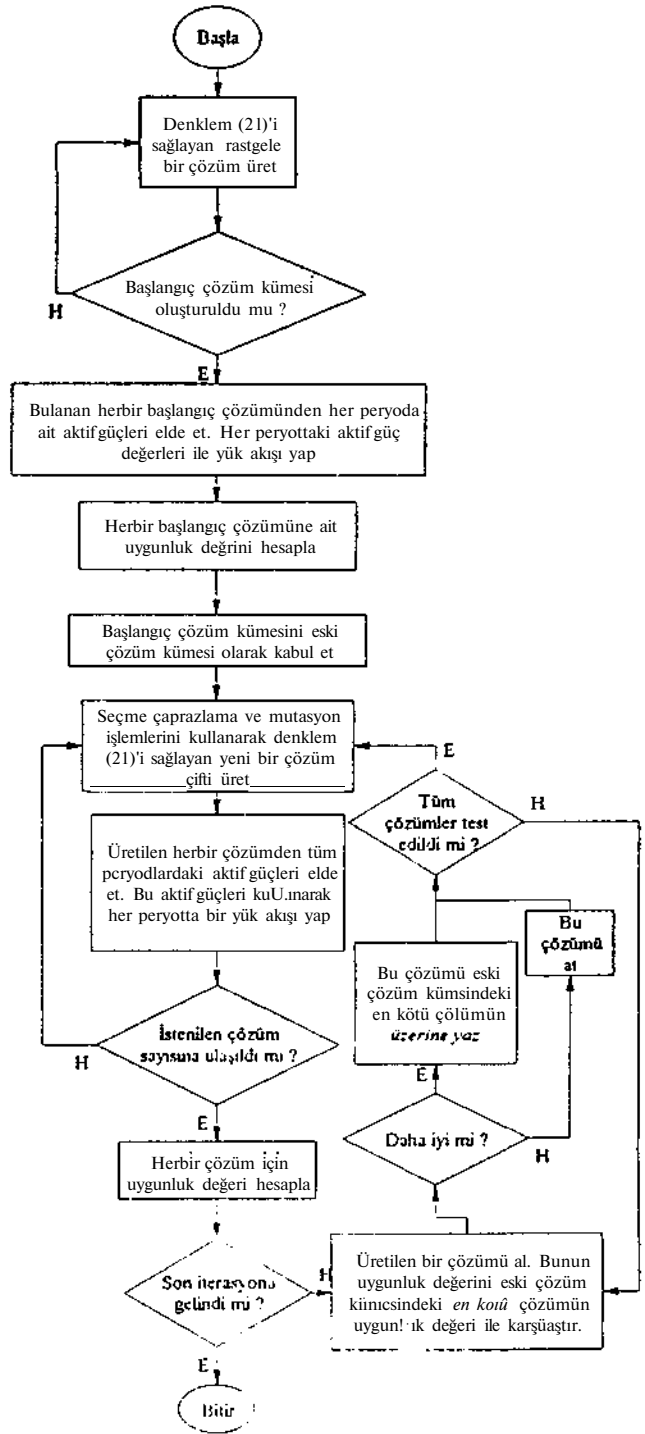
$j$ , periyot sonundaki pompayla doldunmalı birime ait üst rezervuandaki su miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_j = V_{j-x} + q_{pn}(P_{PH,j})t_j \quad \text{eğer } j \in J_{pomp} \quad (19)$$

$$V_j = V_{j-x} - q_{GH}(P_{GH,j})t_j \quad \text{eğer } j \in J_{gen} \quad (20)$$

### 3.3 Kullanılan Genetik Algoritmanın Genci Yapısı

Ele alınan problemin çözümünde kullanılan genetik algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Diyagramdan görüldüğü gibi önce rastgele bir başlangıç çözüm kümesi oluşturulur. Bu çözümlerin oluşturulmasında çözümleri oluşturan her periyoda ait alt diziler (sahram banisi hariç diğer güç değerleri) (21)'de verilen kısıtlan sağlaması gerekir. (21)'de görülen  $K_{yük}$  değeri  $0 < K^* < \infty$  koşulunu sağlayan ve sistemdeki salınım barasırın üst üretim sınırına göre seçilen bir sabit katsayıdır. Çözümlerin (21)'de verilen koşulları sağlaması, hem salınım barasına bağlı birimin her periyotta generatör olarak çalışmasını temin etmekte, hem de (16)'da verilen ceza değerinin sıfır yada



Şekil 1. Kullanılan genetik algoritma) a ait akış diyagramı

$$K_{yük} P_{yük,j} < ( \sum_{n=3,il} P_{Gsjy} + P_{off,j} ) t_j < 7 \cdot J^{-j} gen \quad (21)$$

$$K_{yük} (F_{jilkJ+PH,j}) < \sum_{n \in N_s} \sum_{n' \in snl} U^{n,n'} \cdot I^{j,pomp}$$

$$\sum_{n \in N_s} \sum_{n' \in snl} P_{Gsj,nj} < (P_{yük,j} - P_{PH,j}), \quad j \in J_{pomp}$$

küçük değerler almasını sağlamaktadır. Daha sonra rastgele üretilen her çözümden tüm peryotlara ait üretim ve pompalama güçleri (eğer varsa) bulunarak tüm peryotlar için yük akışı yapılır. Yük akışında Newton-Raphson yöntemi kullanılmaktadır. Bu işlemin bitiminde her çözüme ait uygunluk değeri eşitlik (14)'e göre hesaplanır. Daha sonra çözüm kümesindeki her bir çözümün uygunluk değerine göre çaprazlamaya girecek çiftler seçilir. Seçim işleminde stokastik kalan yöntemi (stochastic remainder selection method) kullanılmıştır [7]. Seçilen çiftler çaprazlanarak yeni çözüm çifti üretilir ve bunlara ait uygunluk değerleri hesaplanır. Bu işlem yeni çözüm kümesi elde edilene kadar devam eder. Elde edilen yeni çözüm kümesinden bir çözüm alınır ve bunun uygunluk değeri eski çözüm kümesindeki en kötü uygunluk değeri ile karşılaştırılır. Eğer yeni çözümün uygunluk değeri daha iyi ise, eski çözüm kümesindeki en kötü çözümün üzerine yazılır. Aksi halde yeni çözüm atılır. Bu işlem yeni çözüm kümesindeki her çözüm için yapılır. Bu işlemler sonucunda bir iterasyon bitirilmiş olur.

#### 4. SİMÜLASYON PROGRAMI

Makalede verilen bilgiler doğrultusunda Delphi programlama dilinde görsel bir simülasyon programı yazılmıştır. Bu simülasyon programı sayesinde kullanıcı ele alınan elektrik enerji sistemine ait bilgileri (bara çeşiti, hat parametreleri, üretim birimleri giriş-çıkış eğrileri, bara yük değerleri vb.) ve genetik algoritma parametrelerini (çözüm kümesindeki çözüm sayısı, iterasyon sayısı, çaprazlama ve mutasyon olasılığı vb.) kolayca programa girebilmektedir. Enerji sistemine ait bilgiler gerekli dosyalarda saklanmaktadır. Böylece kullanıcı genetik algoritmaya ait parametreleri değiştirerek ele alınan problemi yeniden çözebilmektedir. Çözüme ait gerekli bilgiler dosyalar iminde saklanmakta ve önemli olan büyüklükler çözüm esnasında ekranda görüntülenmektedir. Çözümü bitirildikten sonra elde edilen optimal bilgiler ekranda kullanıcıya verilmektedir.

#### 5. SAYISAL ÖRNEK

Hazırlanan simülasyon programı 12 baralı bir örnek elektrik enerji sistemi üzerinde denenmiştir. Bu sistemde bir adet pompayla doldurulmalı birim, beş adet termik birim bulunmaktadır. Sistemde pompayla doldurulmalı birimin verimi 0.67 olarak alınmıştır [8]. Pompayla doldurulmalı birimin üretim modundaki  $q_{L,DP} = gc/ft^2 Cff$  g'nŞ-Ç'kiş eğrisi ile, pompalama modundaki  $P_{PH} = P_{PH}(q_{PH})$  (ters fonksiyon alınarak  $q_{PH} = qpr/(Pp/-/)$  eğrisi elde edilmektedir.) giriş-çıkış eğrisi pompayla doldurulmalı birimin toplam verimi 0.67 olacak şekilde seçilmiştir. Pompayla doldurulmalı birimin altı eşit peryottan oluşan bir günlük işletimi gözönüne alınmıştır. Pompajla doldurulmalı birimin sisteme ilave edilmesi durumunda sistemdeki termik birimlere ait toplam yakıt maliyetinde bir azalma sağlayabilmek için, sistemdeki peryotlara göre yük değişimi ve termik birimlerin giriş çıkış eğrileri uygun şekilde seçilmiştir.

Ele alınan sistem önce pompayla doldurulmalı birim sistemde yok iken çözülmüş ve termik birimlerin toplam maliyeti 124215 R bulunmuştur. Burada çözüm kümesindeki çözüm sayısı 150 alınmış ve minimum maliyete 98. Iterasyonda ulaşılmıştır. Aslında çözüme yakınsama 53.

Iterasyonda olmakta ve maliyet 124942 R ya düşmektedir. Bu çözümde çaprazlama olasılığı 0.9999 ve mutasyon olasılığı 0.0001 alınmıştır.

Daha sonra sistem pompayla doldurmalı birim devrede iken aynı genetik algoritma parametreleri ile çözülmüştür. Minimum maliyet 99. Iterasyonda 116519 R olarak bulunmuştur. Aslında çözüme yakınsama 52. Iterasyonda olmakta ve maliyet 116798 R ya düşmektedir. Sistemdeki reaktif güç üretimleri değiştirilmemektedir. Mukayese amacıyla pompayla doldurulmalı birimin üretim ve pompalama modlarındaki reaktif güç üretim ve tüketimi sıfır alınmaktadır. Makaleye ayrılan yer dört sayfa ile kısıtladığından örnek sisteme ait bilgiler ve çözümünden elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak makalenin sunumu sırasında verilecektir.

#### 6. SONUÇLAR

Makalede pompayla doldurulmalı birim ve termik birimler içeren *kayıplı* bir elektrik enerji sistemi gözönüne alınmaktadır. Böyle bir sistemde pompayla doldurulmalı birimin optimal işletiminin genetik algoritma yardımıyla nasıl çözüleceği gösterilmiştir. Kullanılan genetik algoritmada bir çeşit elitist model kullanılmıştır.

Makalede belirtilen bilgiler ışığında Delphi programlama dilinde bir simülasyon programı hazırlanmıştır. Makalede genetik algoritmanın uygulanması tek bir pompayla doldurulmalı birim için verilmişse de, simülasyon programı birden fazla pompayla doldurulmalı birim içeren sistemleride çözebilmektedir.

#### 7. KAYNAKÇA

- [1] Lee, T., Chen, N., "The Effect of Pumped Storage and Battery Energy Storage Systems on Hydrothermal Generation Coordination" *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 7, No. 4, pp. 631-637, Dec. 1992.
- [2] Cobian, M. J., "Optimal Pumped Storage Operation with Interconnected Power System", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, pp. 1391-1399, May/June 1971.
- [3] Lee, B. Y., Park, Y. M., Lee, K. Y., "Optimal Generation Planning For a Thermal System with Pumped-Storage Based on Analytical Production Costing Model", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 2, pp. 486-493, May 1987.
- [4] Orero, S. O., Inving, M. R., "A Genetic Algorithm Modelling Framework and Solution Technique for Short Term Optimal Hydrothermal Scheduling", *IEEE, Trans. on Power Systems*, Vol. 13. No. 2. pp. 501-516, May 1998.
- [5] Chandrsmouli, A., Ghosh, R. KL, Srivastava, S. C, Mishra, D. K, "Genetic Algorithms: Some Applications to Electric Power Systems", *Proceedings of ISCA International Conference*, Louisville, KY, USA, October 14-16, 1993.
- [6] Sheble, G. B., Brittig, KL, "Refined Genetic Algorithm-Economic Dispatch Example", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, Feb. 1995.
- [7] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-NVesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [8] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., *Power Generation Operation & Control*, John Wiley & Sons, 1984.

# VÜCUT DİRENCİNİN GERİLİME BAĞIMLILIĞININ TOPRAKLAMA TESİSLERİNDE MÜSAADE EDİLEBİLİR ADIM VE DOKUNMA GERİLİMLERİNE ETKİSİ

**M. Hakan HOCAOĞLU**

Mühendislik Fakültesi  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
Gebze-Kocaeli

**A. Turan HOCAOĞLU**

Mühendislik Fakültesi  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
Gebze-Kocaeli

## ABSTRACT

*One of the most important aspects of the earthing system design is to determine the actual touch and step potentials and consequently evaluate the actual values against the established allowable values. National and international earthing standards, in general, provide methods for both. In this paper, the second aspect, establishing the allowable potentials, is analysed.*

*Apart from the IEEE standard 80, the standards reviewed in this paper employ safe current curve given in IEC 479 which establishes human body withstand current and other aspects of electrocution. These aspects include effect of frequency and current path, contact condition of the circuit and voltage dependency of the human body resistance. Particularly effect of the voltage dependency of the human body resistance, however, has not been accounted in any of the standards.*

*Earthing standards demonstrate many similarities on calculation of touch and step potentials and design of the earthing system. However there are discrepancies between standards regarding the treatment of accidental circuit. In this paper these discrepancies are analysed and effect of accounting voltage dependency of human body resistance is demonstrated. It is found that neglecting to account of voltage dependency of the human body resistance may cause an under designed earthing system depending on fault duration.*

## 1. GİRİŞ

Elektrik tesislerinde topraklama şebekesi dizaynı için halen kullanılmakta olan uluslararası ve ulusal standartlar şu şekilde sıralanabilir: BS 7354 [1], ve EA S34 [2], TS 41-24 [3] (İngiltere'de kullanılıyor), IEEE standart.80 [4] (Amerikan standardı), CENELEC CLC/TC 112 -dokuzuncu bölüm- [5] (Avrupa'da geçerli olacak) VDE/DIN 0141 [6] (Alman standardı) ve TSE Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği (Türkiye'de geçerli) [7]. Bu standartların ilgilendiği en önemli konu topraklama sisteminin empedansı,  $Z_c$ , ile herhangi bir toprak arızası halinde bu sistemden akan akımın, I, oluşturduğu ve toprak şebekesi etrafında oluşan istenmedik gerilim yükselmeleridir. Bu gerilim yükselmeleri (Ground Potential Rise yada kısaca GPR) şu şekilde hesaplanabilir.

$$GPR=I.Z_c$$

Böylece bir toprak arızası anında oluşacak olan ve bu gerilimle orantılı olan adım (Step) ve dokunma (Touch) gerilimleri hesaplanabilir hale gelir ki bu gerilimlerin belirlenmiş emniyetli gerilimlerle karşılaştırılması güvenli topraklama şebekesinin temelini oluştururlar. Yukarıda sayılan topraklama standartları gerçek ve emniyetli gerilim değerleri için farklı hesaplama teknikleri ve formülleri sunmaktadırlar. Bu tebliğde arıza anında oluşabilecek gerçek dokunma ve adım gerilimlerinin hesaplanmasındaki farklılıklar değil müsaade edilebilir gerilim değerleri üzerinde durulacaktır.

Her standardın müsaade edilebilir gerilimlerin hesaplanması konusunda verdiği yöntemler ve elektriksel şok devreleri sonraki bölümde incelenecektir. Tüm standartlarda müsaade edilebilir dokunma geriliminin değeri adım gerilimine göre daha düşük olduğu için topraklama sisteminin dizaynı bu gerilim esas alınarak yapılmaktadır. Bu sebeple bildirimiz dokunma gerilimine odaklanacaktır.

## 2. ELEKTRİK ŞOKUNA KARŞI EMNİYET KRİTERİ

Elektrik çarpması ve elektriksel şoka karşı koruma alanında yakın zamanlara kadar yapılan çalışmalar [8, 9] IEC tarafından standartlaştırılarak rapor haline getirildi (IEC 479) [10]. Bu standartta çarpılma akımının zamana bağlılığı önemle vurgulanmakta ve bir Kuzey Amerika pratiği olan Daizel'in önerilen ve vücut ağırlığına göre belirlenmiş formülleri [11] yerine 'S' şekline benzer ve olasılık bakımından sınıflandırılmış bir seri eğri tavsiye edilmektedir. Bu eğriler elektriksel şok riskini zamana bağlı olarak %5, %10 ve %95 (c1, c2 ve c3 eğrileri) [10] olarak değerlendirilmiştir.

Ayrıca IEC 479'da detaylı bir şekilde tanımlenen insan bedeninin direncinin gerilime bağlılığı ve elektrik akımının vücutta takip ettiği yol, topraklama uçları, julanlar, tavanı tamamlamada genellikle ihmal edilmektedir. Akımın vücutta takip ettiği yolun bağlı olarak hem vücut direnci deyişinde, hem de 30 arasında) hem de akımın kalp üzerinden akmasıyla çarpılma riski değmektedir.

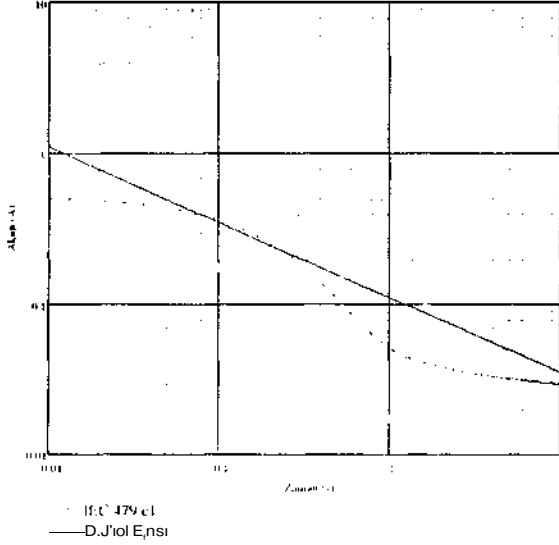
Özetlendiği üzere müsaade edilebilir akımın belirlenmesinde Kuzey Amerika ve Avrupa menşeli başlıca iki yöntem bulunmaktadır. Birisi IEC tarafından geliştirilmiş olan ve IEC 479'da bir inar için seçilen olaştıra verilen formül

$$I_b = \frac{0.116}{\sqrt{7T}} \quad 2.$$

diğeri ise IEC tarafından geliştirilen eğrilerdir (IEC eğrisi için insan ağırlığının ehemmiyeti yoktur). Bu iki yöntemin direk karşılaştırılmasına imkan tanımak için IEC el eğrisi matematiksel olarak non-linear regresyon teknikleri kullanılarak formül 3 ile ifade edilmiştir [12].

$$I_b = 0.4455e^{-\frac{t}{2M5}} + 0.027 < ?^{t+1} \quad 3.$$

Her iki formülde de  $I_b$  müsaade edilebilir akım sınırını  $t$  ise şok süresini göstermektedir. Aşağıdaki şekilde Dalziel'in formülü ile IEC 479 da verilen eğri karşılaştırılmıştır.



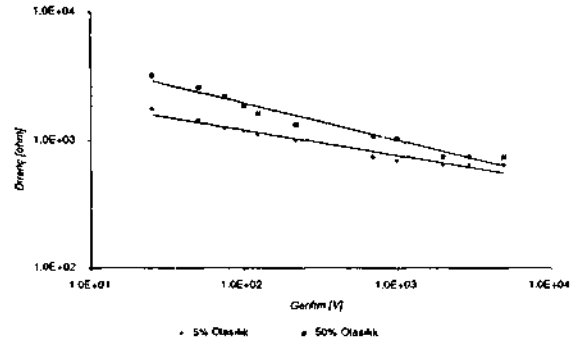
Şekil 1 Müsaade edilebilir vücut akımlarının karşılaştırılması

Şekilden görüleceği gibi Dalziel formülleri daha iyimser olmasına rağmen özellikle 70ms ile 700ms arasındaki değerler için IEC eğrisi daha iyimser kalmaktadır. Güç sistemlerinde devre koruma elemanlarının genellikle bu /aman skalasında çalıştığı düşünülecek olursa bu farkın topraklama sistemlerinin, dizaynı yönünden önemi daha da ortaya çıkar.

### 3. (GERİLİME BAĞIMLI VCci/r DİKİNCİ

IEC 479 i'isan vüctvianun dilencinin u.guLman gerilime bağlı olduğLinu ve .ahit onük bir diren:•ten /ıvade bir ağ yapısı ile birbirine haİli Kapasitan.\ ve dirençlerden oluşuğunu kabul erimi-çur. Bunu.ila birlikti.' m^ in derisinin yapısından kaynaklanan kapasitil e'kı yüksi-k gerilimlerde kaybolmaktadır

Vücut direncinin ve e"ipedan.sının L'er lınv. iv.ülülüğü çeşitli lablolarla eösterilnı>ır Bu calı^'uu'.ı elektrik istasyonu içindeki emniyet krr.eri :::eeieiiJiğınJen ve maruz kalınan gerilim genellik'e yül.>,.l. olacağından \ IK :• empedansının sadece omiv bileşeni .e>aba kull'iıi,-•:: ,\,aû.,;akı kış-log grafik standartta ven ir dejerie'^len aın -M> 'iup b'ı ilişkiyi gösiermektedir.



Şekil 2 Gerilime bağlı vücut dirençleri.

Bu eğriler için en küçük kareler yöntemi kullanılarak matematiksel bir ifade şu şekilde yazılabilir [12].

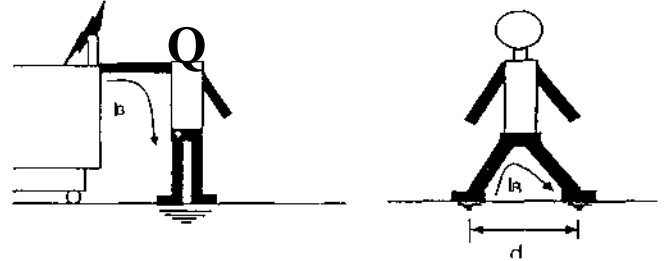
$$R_b = 2953V^{0.1958} \quad 5\% \text{ Curve} \quad 4.$$

$$R_b = 7295V^{-0.2858} \quad 50\% \text{ Curve} \quad 5.$$

Bu formüller bundan sonraki parametrik incelemelerde kullanılacaktır.

### 4. TOPRAKLAMA STANDARTLARI

Yukarda zikredilen bu standartlar arasında bazı farklılıklar olmasına rağmen bir çok benzerlikler de mevcuttur. IEEE standart 80 haricinde ki bütün standartlar IEC 479 tarafından düzenlenmiş müsaade edilebilir akım değerlerini kendi müsaade edilebilir gerilim değerlerini tespit etmek için kullanmaktadırlar. IEEE standart 80 ise Dalziel tarafından tespit edilen değerleri kullanmaktadır. İncelenen bütün standartlar dokunma ve adım gerilimlerinin tarif etmek için farklı yollar kullanmakla birlikte Şekil 1 de verilene benzer bir durum öngörmektedir.



Şekil 3 Dokunma ve adım gerilimleri ile alakalı durumlar.

Dokunma durumu tüm standartlarda aynı olmakla birlikte dokunma gerilimini:] tanımı \ J elektrik;--.' ;<>k devresinin elemanları konusunda ila .•.ar.Ja;::: .-.<.' :ı-ı: farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar - :: :-••••• arasında uyumlulaştırılmaya olan ihtiyaç daha o'me ce ütie L' :•••••miş olmakla birlikte [13, 14] standartlar arası iarklılık aala sürmektedir.

#### 4.1. IEEE Standart 80

Bu standart dokunma ggerilimini şu şekilde tanımlamaktadır: 'Toplam toprak gerilimi (GPR) ile topraklanmış metalik yapıya dokunan insanın durduğu noktanın gerilimi arasındaki potansiyel fark.' Bu tanım aşağıdaki şekilde desteklenmekte ve standart bir ^eri varsayımında bulunmaktadır. Bu varsayımların konumuzla alakalı olanları diğer standartlarla birlikte Tablo 1 de sunulmuştur.



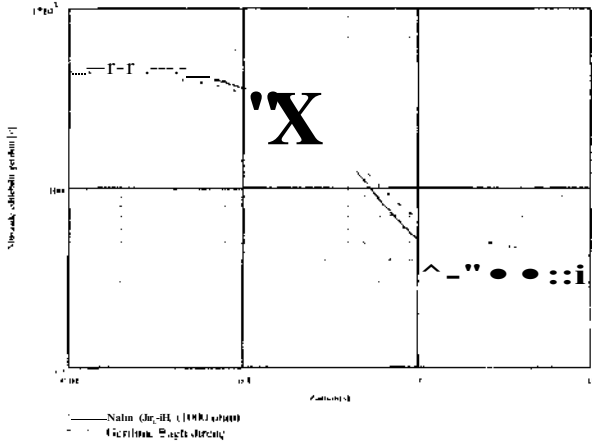


## 5. KARŞILAŞTIRMA

Yukarıda özetlendiği gibi topraklama standartları genellikle vücut direncinin gerilime bağımlılığını ihmal etmektedirler. Bunun ne gibi bir neticeye yol açacağı bu bölümde gösterilmiştir. Müsaade edilebilir gerilim seviyesi sadece vücut direnci göz önüne alınarak formül 3 ün formül 4 ve 5 ile birleştirilmesi ile;

$$V_s(t) = I_s(t)R_B(V) \quad 5$$

formülü elde edilir. Bu non-linear denklemin çözümü yağıdaki şekilde sunulmuştur. Ayrıca Vücut direnci 1000D . • ıbit kabul edilerek hesaplanan bir eğride aynı grafik üzerinde karşılaştırma amacıyla sunulmuştur.



Şekil 5 Gerilime bağlı vücut rezistansının müsaade edilebilir gerilime etkisi.

Yukarıdaki şekilden görüleceği üzere kısa süreli arızalarda 10000 luk sabit direnç daha yüksek gerilimlere müsaade etmekte ve bu tehlike arz eden bir topraklama sistemi dizaynına yol açabilmektedir. Uzun süreli arızalar için ise tam tersi bir durum söz konusudur. Şayet ilave dirençler de hesaba katılacak olursa hesap bir miktar karmaşıklaşmakla birlikte gerilime bağımlılığın önemi yukarıdaki şekilden de görülmektedir

## 6. SONUÇLAR

1. Uluslararası topraklama standartları arasında bir uyumlulaştırmağa ihtiyaç vardır.
2. TSE tarafından hazırlanmış olan eski topraklama yönetmeliğinin yeni gelişme ve ihtiyaçlar doğrultusunda yenileştirilmesi ve hesaplama dayalı yöntemlerinde standarda dahil edilmesinde fayda vardır.
3. Vücut direncinin, gerilime bağımlılığını ihmal edilmesi şok suresini' bağılı olarak yetersiz/ dız:ın edilmesi topraklama sistemlerine yol açabilecektir
4. Topraklama sisteminin dizaynında <:~> hareketine geçme süresi hayli önem arz imektedir Arıza yerine göre bu sürelerin dikkate alınması yereknüde lir
5. Hesaplamanın ilave dirençler he--.Aı kanlar :k .lı tekrarlanması halinde benzer sonuçlar vermektedir.

## KAYNAKÇA

- 1 BS 7354:1990: 'Code of Practice for Design of High-Voltage Open-Terminal Stations'. BSI Standard.
- 2 EA S-34, (Electricity Association, Engineering Recommendation S.34) 1986: 'A Guide for Assessing the Rise of Earth Potential at Substation Sites', Electricity Association Services Limited, London, 1986
- 3 EA TS-4I-24, (Electricity Association, Technical Specification 4I-24) 1992: 'Guidelines for the Design, Installation, Testing and Maintenance of Earthing Systems in Substations', Electricity Association Services Limited. London (Issued 1994)
- 4 IEEE/ANSI Std 80-1986: 'IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding' (IEEE Standard board, NY, USA)
- 5 prEN 50179-1996: 'Power installations exceeding 1 kV ac'. CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardisation) CLC TC 99X (July 1997 Draft).
- 6 DİN VDE 0141:1989: 'Earthing Systems for Power installations with Rated Voltages Above 1 kV (Technical Help to Exporters Translations, British Standard Institution, Milton Keynes. UK)
- 7 TSE 'Türk Standartları Enstitüsü): 'Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği'. (TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İzmir, Nisan 1992).
- 8 BIEGELMEIER, G, LEE, W.R.: 'New Considerations on the threshold of Ventricular Fibrillation for a.c. Shocks at 50-60 Hz', Proceedings of IEE. March 1980, Vol. 127, No. 2. Pt. A, pp. 103-110
- 9 BRIDGES, J.E., VAINBERG, M., YVILLS, M.C.: 'Impact of Recent Developments in Biological Electrical Shock Safety Criteria', IEEE Trans. on Power Delivery, January 1986 \ol. 2, No.1, pp. 238-248
- 10 IEC 479-1: 'Guide to Effects of Current on Human Beings and Livestock, Part 1 General Aspects'. International Electrotechnical Commission IEC publication, 1994
- 11 ALZIEL, C.F., LEE, W.R.: 'Re-evaluation of Lethal Electric Currents', IEEE Trans. on Industry and General Applications, Sept./Oct. 1968. Vol. 4, No. 5, pp. 467-476
- 12 HOCAOĞLU M.H.: "Power system transients and earthing systems", PhD. Thesis. Cardiff 1999
- 13 DWIES, A.M. GRIFFITHS, H. and BEDDOES, J.: 'Standards Applicable to Earthing System Design - What is the way forward?'. Proceedings of the 1995 UPEC. November 1995. Greenwich U. K.. Vol. C. pp. 455-458
- 14 PİÇKEN, G. H.: 'A Review of Standards for High-Voltage Installations'. ERA Technology Conference, Earthing Systems - Which Path to Follow?, July 1993, PP. 2.1.1-2.1.14.

# ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE TRANSFORMATÖRLERİN NÖTRÜNÜN NON-LİNEER REAKTÖRLE TOPRAKLANMASINDA YÜKSEK GERİLİM GÜÇ KESİCİSİNİN KONTAKTLARI ARASINDA OLUŞAN GEÇİCİ TOPRAKLANMA GERİLİMİNİN ANALİZİ

Sabir Alioğlu RÜSTEMOV  
Mehmet Sıraç ÖZERDEM  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Dicle Üniversitesi  
21250 Diyarbakır  
E-mail : sozerdem@dicle.edu.tr

## ABSTRACT

//; this study, the comple.r component of the shori circuit currents' velocities approuching lo zero value lud heen researehed \\hen the transformötör neutral UYM gnmmed »it/ı the non-linear reactor in the electrical nenv., >-ks. The r-^sibility of the circumstance of the effeciive grounding ho\\vn when this ineihod was benefhed for restricing :••. .eiocity, approuching the velocity, approuching to the zerü Iexel, of the shori circuit currenl. The iransient restoration voltage is also existed between the switch couiacts when the shori circuit condition removes. In ı/ıis sludy, the effeciiveness of the neutral line. grounding \\ıth the non-linear reactor was shown for resiricing the raling velocity, and anplitude of this iransient restoration voltage.

## 1. GİRİŞ

Enerji İletim sistemlerinde yüksek gerilim güç kesicilerinin açma kabiliyetlerini artırmanın en etkili yolu kısa devre akımlarına sıfır değeri civarında etki etmektir. Bu amaçla simetrik olmayan kısa devre akımlarını sınırlamak için transformatörlerin nötrlerinin çeşitli şekillerde topraklanması önerilmiştir. Ancak bugüne kadar simetrik olmayan kısa devre akımlarını önlemek için non-lineer reaktörle topraklanma uygulanmamıştır. Non-lineer reaktör kısa devre akımlarına sıfır değeri civarında etki eder ve onun asıl görevi yüksek gerilim güç kesicilerinin açma başarısını yani kabiliyetini yükseltmektir. Bu tür reaktör, transformatörün nötrünün izolasyonunun değişmesini gerektirmez. Bu bakımdan 220 kV ve daha yüksek gerilimli Enerji iletim şebekelerinde transformatörlerin nötrleri non-lineer reaktörle topraklanabilir.

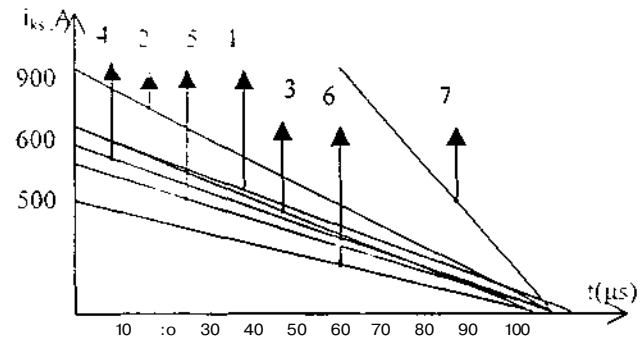
Nötr non-lineer reaktörle topraklanmış şebekelerde, non-lineer reaktörün bir fazlı kısa devre akımlarına sıfır değeri civarında efektif etki etmesiyle beraber, bu reaktör kısa devre ortadan kaldırıldıktan sonra kesicinin kontakları arasında oluşan geçici topraklanma geriliminin değişme hızına da etki eder, bu ise kesicilerin açma kabiliyetinin

yükseltilmesini sağlar. Üç fazlı kısa devre olduğu kısa devre akımlarının simetrik olması nedeniyle, non-lineer reaktör akımlara sıfır değeri civarında etki edemez. Ancak kesicinin kontakları arasında oluşan geçici topraklanma geriliminin değişim hızına etki eder. Görüldüğü gibi kesicilerin açma kabiliyeti üç fazlı kısa devrelerde de non-lineer reaktörle iyileştirilmiş olur.

## 2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

[Bu çalışmada nötrü non-lineer reaktörle topraklanmış şebekelerde kesicinin kontakları arasında oluşan geçici topraklanma geriliminin hesabına bakılmıştır. Şekil 1' de böyle bir şebeke gösterilmiştir.

Hesaplar reaktörün nominal gerilimi şebekenin maksimum geriliminin %10 ve %20'sini teşkil ettiği hale uygun yerine getirilmiştir. Her bir nominal gerilime farklı nominal akım kabul olunmuştur. Kısa devre açıldıktan sonra işte kalan hatların sayısı  $n=1, 2$  ve  $4$  kabul olunmuştur. Şebekede kısa devreden sonra işte kalan hatların sayısı  $1, 2$  ve  $4$  olduğundan kısa devre akımının sıfır değerine yaklaşması şekil 2' de gösterilmiştir. Bu şekildeki  $i_{ks}$  vs  $t$  eğrisi transformatörlerin nötrünün reaktörle topraklanması için  $1, 2, 3, 4, 5, 6$  eğrileri non-lineer reaktörle topraklandığı zaman ve  $7$  eğrisi ise nötrün direk topraklanması sonucunda elde edilmiştir.

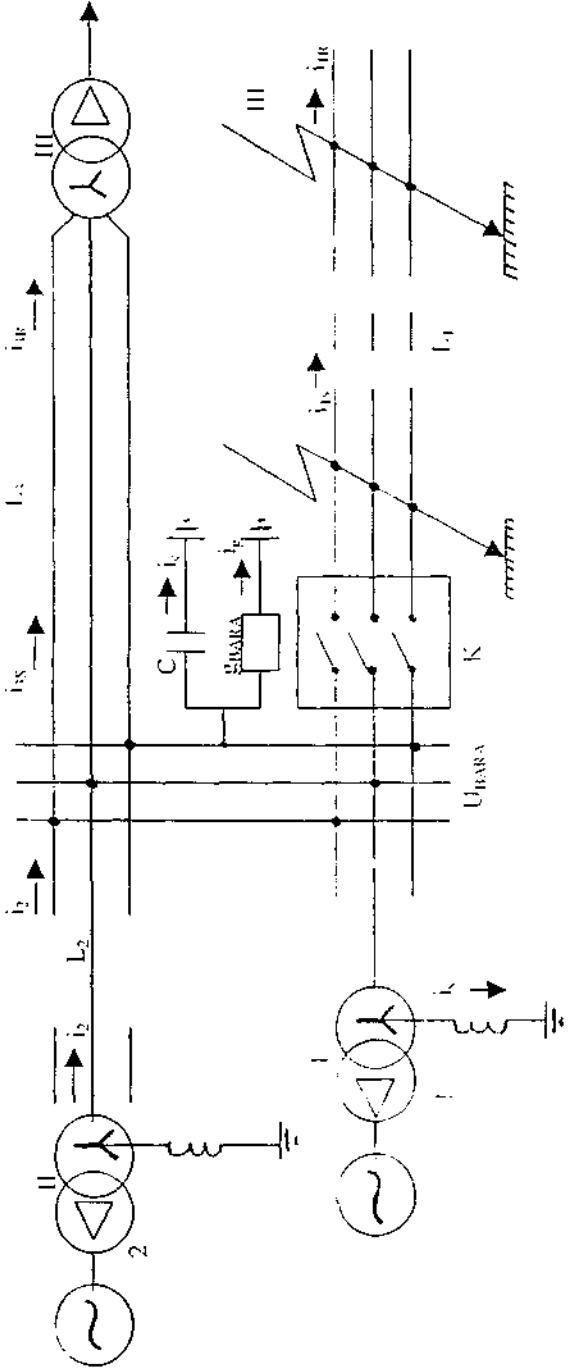


Şekil 2. Kısa devre akımlarının sıfır değerine yaklaşımı

$U_{im}$ ; in parametreleri uygun olarak  $\%10U_{im}$ , 600A;  $\%10U_{im}$ , 12 KA;  $\%10U_{im}$ , 20 KA;  $\%20U_{im}$ , 12 KA ve  $\%20U_{im}$ , 20 KA seçilerek hesaplar çıkarılmıştır. Seçilen varyantlar içerisinde en uygunu reaktörün parametresi  $U_n = \%10U_{im}$ ,  $I_n = 20$  KA olan halidir.

Ayrıca mesafe kısa devrelerinin de açılmasına bakılmıştır. Buradan alınmış hesap sonuçları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1. 3 fazlı mesafe kısa devrelerin açılması zamanı nötrün lineer ve non-linear reaktörle topraklanması etkinliği (işte kalan hatların sayısı  $n=4$ ).

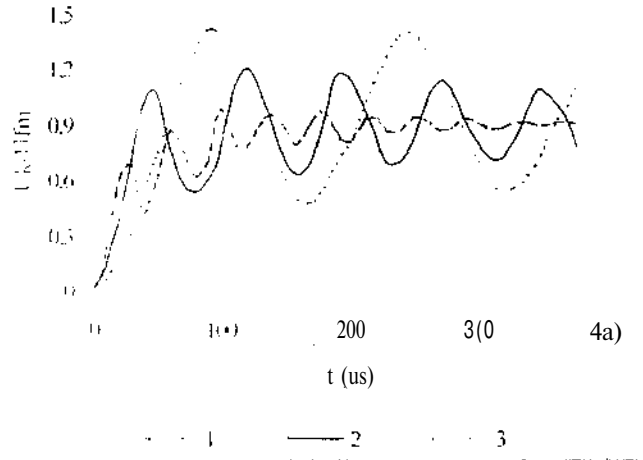


Şekil 1. Nötrü non-linear reaktörle topraklanmış şebeke şeması

No	Reaktörün Türü ve Parametreleri	Geçici Topraklama Geriliminin Değişim Hızı KV/µs Açılan Fazlar			Geçici Topraklama Geriliminin Genliği Açılan Fazlar		
		I	II	III	I	II	III

1	Lineer Reaktör 2,4 ohm	0,35	0,68	0,42	1,28	1,22	0,97
2	Kon-linear reaktör $U_n = \%10U_{im}$ $I_n = 600A$	0,55	0,43	0,38	1,46	0,89	0,71
3	Non-linear reaktör $L_n = \%10L_{im}$ $I_n = 12KA$	0,4	0,49	0,35	1,3	0,88	0,94
4	Non-linear reaktör $U_n = \%10U_{im}$ $I_n = 20KA$	0,4	0,52	0,35	1,25	0,89	0,97
5	Non-linear reaktör $U_n = \%20U_{im}$ $I_n = 12KA$	0,4	0,55	0,3	1,4	0,88	0,87
6	Non-linear reaktör $U_n = \%20U_{im}$ $I_n = 20KA$	0,4	0,55	0,3	1,35	0,89	0,8

Mesafe kısa devresinin ortadan kaldırıldığı zaman geçici topraklama geriliminin değişimi şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 2. Geçici topraklama geriliminin değişimi

Burada 1 tür:  $k_{ij}$  dire açıldıktan sonra devrede kalan hatların sayısı 3 olduğunda ve transformatörün nötrü  $U_n = \%10U_{im}$ ,  $I_n = 20$  KA parametresine sahip non-linear reaktörle topraklanmıştır.

reaktörle topraklandığında açma akımı maksimum kısa devre akımının %70' ini, 2 eğrisi %60' ını ve 3 eğrisi ise %30' unu oluşturduğu zaman alınmıştır.

### 3. SONUÇLAR

Elektrik şebekelerinde transformatörlerin nötrü non-lineer reaktörle topraklandığında kısa devre akımının sıfır değerine yaklaşma hızının kompleks analizine bakılmıştır. Kısa devre akımının sıfır değerine yaklaşma hızını sınırlamak için bu metod' dan yararlanıldığı zaman efektif topraklama şartının olasılığı gösterilmiştir.

Kısa devre açıldıktan sonra kesicinin kontaktları arasında oluşan geçici topraklanma geriliminin değişim hızının ve genliğinin sınırlanmasında nötrün non-lineer reaktörle topraklanmasının efektifliği gösterilmiştir.

### 4. KAYNAKLAR

- [1] Elektrofizika ve Elektroenergetika Sahesinde makaleler mecmuesi, Baku: Elm, 1994, s. 190-211.
- [2] Elektrofizik ve Elektroenerji alanında makaleler mecmuesi, Baku: Elm, 1997, s. 152-158.
- [3] Ragallera, K. Yüksek Gerilim Şebekelerinde Açma Akımları, Moskova 1981.

# KAPASİTİF REAKTİF GÜÇ YERLEŞİMİNİN SİSTEM KAYIPLARI AÇISINDAN İNCELENMESİ

Mustafa BAĞRIYANIK

F. Gül BAĞRIYANIK

Hasan DAĞ

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
80626 Maslak/İstanbul

## ABSTRACT

*A reliable and dependable power system operation among other things requires a good reactive (both capacitive and inductive) power support due to the need of rotating machines and loads. In this study, we present a detailed analysis of the effect of both the shunt capacitive (assuming system is heavily loaded) and series compensation on power system losses. We also try to assess the usability of some indices showing the relationship between losses and above mentioned compensation in addition to determining a suitable place for compensation devices. We conduct our analysis on some Standard IEEE test systems and present the results.*

## GİRİŞ

Elektrik güç sistemlerinde, iletim sistemi elemanlarının reaktif bileşeni baskın olan elemanlar olması ve tüketicilerde reaktif güç ihtiyaçları nedeniyle güç sistemlerinin tasarım ve işletiminde reaktif güç, göz önünde tutulması gereken önemli bir faktördür. Güç sisteminin reaktif güç ihtiyacı generatörlerin yanı sıra reaktif güç kompanzasyon cihazları ile de karşılanmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu, seri ve şönt kompanzasyon olarak ikiye ayrılabilir. Yaygın olarak kullanılan kompanzasyon cihazları ise seri kapasitör bankları, şönt reaktörler, şönt kapasitör bankları ve statik Var kondansatörlerdir. Güç sistemlerinde kompanzasyon cihazları, sistem kararlılığını (sürekli-hal, dinamik ve geçici-hal) iyileştirmek, sistem gerilim değerlerini iyileştirmek ve sistem kayıplarını azaltmak gibi gereksinimler nedeni ile kullanılır. Sistem planlamasında kullanılacak kompanzasyon cihazının tipini, yerini ve büyüklüğünü uygun biçimde belirlemek, güç sisteminin işletim aşamasında güvenilir ve ekonomik bir işletimini sağlamak açısından önemlidir. Bu konuya literatürde çeşitli amaçları tek başına ya da bir arada ele alan planlama ve işletim safhalarına ilişkin bir çok makale yer almaktadır [1].

Bu çalışmada şönt ve seri kapasitif kompanzasyonun sistem kayıpları üzerindeki etkisi ve kayıpların azaltılması için uygun parametrelerin (bara ve hat) belirlenmesinde kayıplar ile kompanzasyon aygıtlarının sağlayacağı reaktif güç arasındaki ilişkiyi incelemek amaçlanmıştır.

## 2. GÜÇ SİSTEMİ İLETİM KAYIPLARI

Güç sistemlerinde iletilen güce bağlı olarak iletim hatları üzerinde aktif ve reaktif güç kayıpları oluşur. Sistemin ekonomik ve güvenilir çalışmasını sağlamak açısından bu kayıpların en aza indirilmesi gerekir. Çünkü, kayıplar yüksek olurda sistemde yer alan generatörler bu kayıpları karşılamak zorunda kalacaklarından hem enerjinin maliyeti yükselecek hem de kayıp gücün büyüklüğü nedeni ile üretim rezervleri azalacak, generatörler limitlerine yakın çalışma durumuna geleceklerdir ve bunun sonucunda sistem kararlılığı olumsuz yönde etkilenecektir.

Bir elektrik güç sisteminde,  $i$  ve  $j$  baraları arasında bağlı olan  $k$ -nci iletim hattında oluşan aktif güç kaybı,

$$P_{L-k} = G_k V_i^2 + I_j^2 - 2 V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (D)$$

reaktif güç kaybı ise,

$$Q_{L-k} = B_k (V_i^2 - V_j^2) - 2 V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

dir. Bu eşitliklerde,

$G_k$ ;  $k$ -nci iletim hattının kondüktansı,

$B_k$ ;  $k$ -nci iletim hattının süseptansı,

$V_j$ ;  $j$ -nci bara geriliminin genliği ve

$S_j$ ;  $j$ -nci bara geriliminin faz açısıdır.

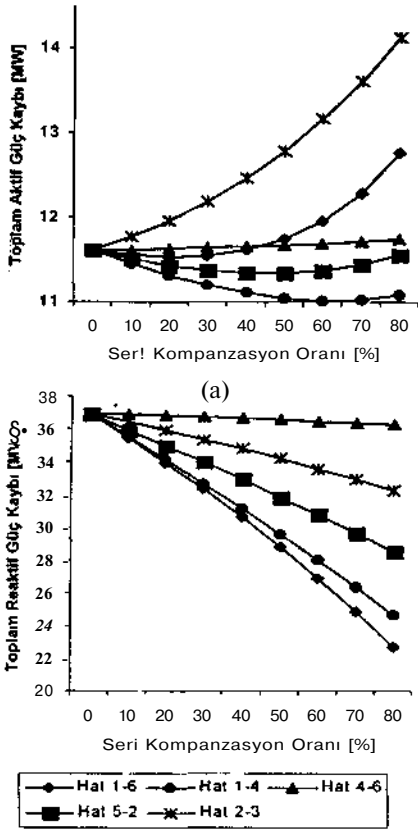
Güç sisteminde iletim hatları üzerinde oluşan toplam aktif güç kaybı,

$$P_L = \sum_{k=1}^n P_{L-k} \quad (3)$$

ve toplam reaktif güç kaybı ise,

$$Q_L = \sum_{k=1}^n Q_{L-k} \quad (4)$$

dir. Burada,  $n$ , toplam iletim hattı sayısıdır [2-3].



(b)

Şekil 1. 6-baralı test sistemi için seri kompanzasyon ile a) aktif güç kaybı, b) reaktif güç kaybının değişimi.

### 3. SERİ KOMPANZASYON

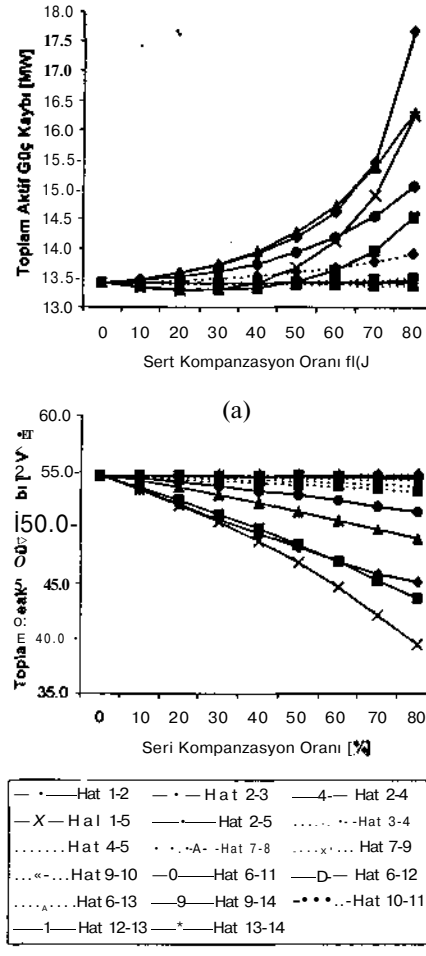
Güç sistemlerinde seri kompanzasyon iletim hattı üzerinde uygun yerlere iletim hattına seri olarak yerleştirilen kapasitör bankları ile yapılır. Seri kompanzasyon yerleştirildiği iletim hattının reaktansı üzerinde azaltıcı bir etki yaptığı için, özellikle sistem kararlılığı ve iletim hattı reaktif güç kayıpları üzerinde olumlu etki yaratır. Seri kompanzasyon miktarı, yerleştirildiği iletim hattının reaktansını ne kadar kompanse ettiğine göre yüzde olarak verilir,  $K_S$ ,

$$K_S = \frac{X_c}{X_k} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5)$$

Burada,  $X_c$ , kompanse reaktansdır.

Seri kompanzasyon yüzdesi belirlenirken, sub-senkron rezonans ve koruma sistemi açısından da incelemelerin yapılması gerekir [4].

Bu çalışmada seri kompanzasyonun hat kayıpları üzerindeki etkisini göz önüne aldığımız için incelemeler bu açıdan yapılmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan Ward-Hale 6 baralı ve IEEE-14 baralı test sistemleri [5] göz önüne alınmış ve kayıplarla kompanzasyon ilişkisi yük akışından yararlanılarak elde edilene çalışılmıştır.



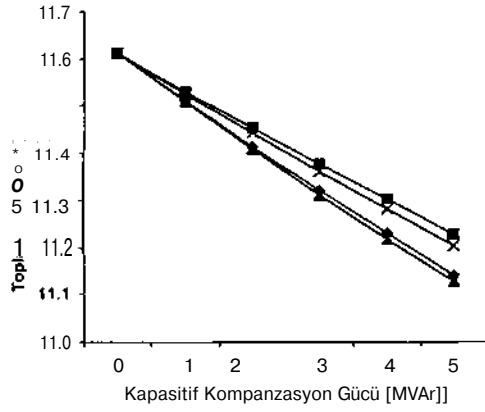
(b)

Şekil 2. 14-baralı sistem için seri kompanzasyon ile a) aktif güç kaybı, b) reaktif güç kaybının değişimi.

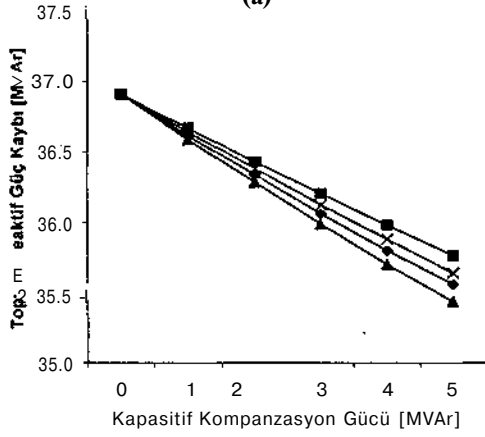
Ward-Hale 6 baralı test sistemi için seri kompanzasyon ile sistemin toplam aktif ve reaktif güç kaybının değişimi Şekil 1 de verilmiştir. IEEE-14 baralı test sistemi için benzer biçimde elde edilen eğriler ise Şekil 2 de verilmektedir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi seri kompanzasyonun reaktif kayıpları üzerindeki etkisi azaltıcı biçimde olmaktadır. Aktif kayıpları açısından ise kompanzasyon yapılan hattın kayıpları üzerinde çok farklı değişimlere neden olduğu görülebilir. Bu nedenle, kompanzasyon yapılacak olan hattın uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir.

### 4. ŞÖNT KAPASİTE YERLEŞİMİ

Elektrik güç sistemlerinde şönt kompanzasyon; reaktif güç kayıpları, şönt kapasitör bankları ve statik Var kompanseörleri ile yapılır. Enerji iletim hatlarının kapasitif etkileri nedeni ile genelde iletim hatları hat başlarına yerleştirilen şönt reaktif güç kayıpları ile kompanse edilir. Fakat ağır yük koşullarında sistem işletim koşullarını kararlılık ve kayıpları açısından iyileştirmek için uygun baralara şönt kapasitör grupları yerleştirilmesi de gerekli olabilir. Bunlar yalnızca kapasitör bankları şeklinde olabileceği gibi sistemde hafif yük koşulları da dikkate alınarak paralel reaktif güç kayıpları ve kapasitör gruplarından oluşan Statik Var Kompanseörleri (SVC) şeklinde de olabilir [1,4].



(a)



(b)

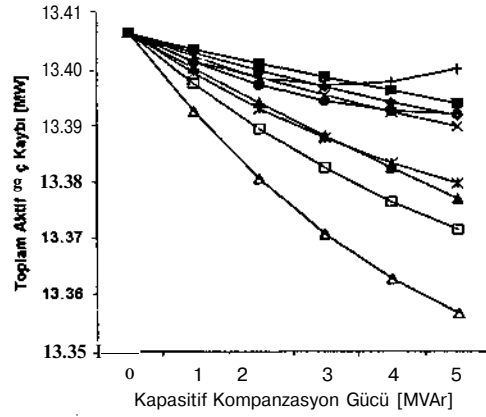
Şekil 3. 6-baralı sistem için şönt kompanzasyon ile  
a) aktif güç kaybı, b) reaktif güç kaybının değişimi

Bu çalışmada kapasitif reaktif güç ile kayıplar arasındaki ilişki üzerinde durulduğu için göz önüne alınan test sistemleri üzerinde yük haralarında yapılacak reaktif güç yerleşiminin aktif ve reaktif kayıplar üzerinde yaptığı değişimler elde edilmiştir. Bu değişimler farklı kompanzasyon güçleri için Şekil 3 ve Şekil 4 de verilmiştir.

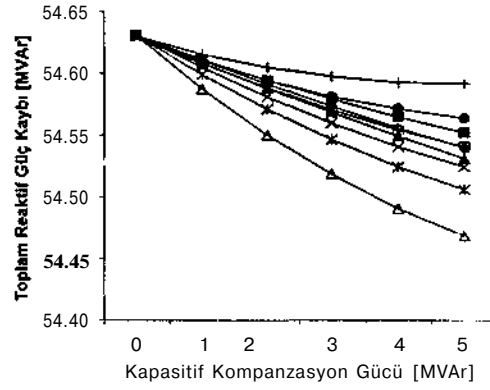
##### 5. DUYARLILIK ANALİZİ

Gerçek bir elektrik güç sisteminin oldukça çok sayıda bara ve hatta sahip olması, sistemde bir hat veya baraya yeni bir eleman yerleştirilmesi yapılacağı zaman bütün alternatifler (hatlar ve baralar) üzerinde tek tek inceleme yapmayı güçleştirir. Bu nedenle, incelemelerde sistemin, temel çalışma koşullarında göz önüne alınan amaçlar doğrultusunda duyarlılık incelemeleri yapılır [2-3,6-7]. Bu çalışmada, aralarında kuvvetli ilişki olan, seri kompanzasyon ile reaktif kayıplar ve şönt kompanzasyon ile aktif kayıplar arasındaki duyarlılık ifadeleri aşağıda verilmiştir.

Bir elektrik güç sistemindeki reaktif güç kaybının,  $\gamma$  ve  $j$  haraları arasında bağlı olan  $k$ -nci iletim hattının reaktansının değişimine olan duyarlılığı,



(a)



(b)

Şekil 4. 14-baralı sistem için şönt kompanzasyon ile  
a) aktif güç kaybı, b) reaktif güç kaybının değişimi

$$\frac{\partial Q_L}{\partial X_k} = \frac{R_k^2 - X_k^2}{(R_k^2 + X_k^2)^2} \cdot (V_i^2 + v_j^2 - 2V_i V_j \cos(S_i - S_j)) \quad (6)$$

dir. Bu değer hesaplanarak hangi hat reaktansındaki değişimin reaktif kayıpları daha fazla etkilediği belirlenebilir [3].

Sistemde bulunan yük baralarındaki toplam reaktif güç değişimi  $\Delta Q$  ile, toplam aktif güç kaybındaki değişim  $\Delta P_L$  arasındaki ilişki,

$$[\Delta P_L] = \left[ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \right] [\Delta Q] \quad (7)$$

ile elde edilebilir. Bu eşitlikte yer alan  $\frac{\partial P_L}{\partial Q}$  toplam aktif kayıpların, yük baralarındaki reaktif güç değişimine olan duyarlılığını verir. Bu duyarlılık değerlerinin sıralanması ile hangi baradaki reaktif güç değişiminin kayıpları daha fazla azalttığını belirleyebiliriz [2,8].

Bu çalışmada göz önüne alınan 6 baralı ICM sistemi için yukarıda veriler, duyarlılık ifadeleri hesaplarına: ilk reaktif güç



yerleşimi için uygun yerler sıralanmıştır. Tablo 1 reaktif güç kaybı ve seri kapasite yerleşimi açısından 6 baralı test sistemi için yük akışı çözümleri ile elde edilen sıralama ( $K_s = \%50$ ) ile duyarlılık ifadesinden elde edilen sıralamayı göstermektedir. Tablo 2 ise aktif güç kaybı ve şönt kapasite yerleşimi açısından sonuçları gösterir. 14 baralı test sistemi için benzer biçimde elde edilen sonuçlar Tablo 3 ve Tablo 4' de verilmiştir. Her iki tablodan, duyarlılık göstergeleri ile elde edilen sonuçların oldukça tatmin edici olduğu açıktır. Özellikle küçük güçlerdeki kompanzasyon değerleri için indislerden elde edilen sonuçların güç akışından bulunan sonuçlara uyması indislerin rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Bu da, çok büyük güç sistemlerinde zamandan büyük tasarruf anlamına gelir ve bu sayede çok fazla analiz yapma olanağını elde edebiliriz.

Tablo 1. Reaktif güç kaybı ve seri kapasite yerleşimi açısından 6 baralı test sistemi için karşılaştırmalı sonuçlar.

Eğriden	Duyarlılık indisinden
Hat 1-6	Hat 1-4
Hat 1-4	Hat 1-6
Hat 5-2	Hat 5-2
Hat 2-3	Hat 2-3
Hat 4-6	Hat 4-6

Tablo 2. Aktif güç kaybı ve şönt kapasite yerleşimi açısından 6 baralı test sistemi için karşılaştırmalı sonuçlar.

Eğriden	Duyarlılık indisinden
Bara 5	Bara 5
Bara 3	Bara 3
Bara 6	Bara 6
Bara 4	Bara 4

Tablo 3. Reaktif güç kaybı ve seri kapasite yerleşimi açısından 14 baralı test sistemi için karşılaştırmalı sonuçlar.

Eğriden	Duyarlılık indisinden
Hat 1-5	Hat 1-2
Hat 1-2	Hat 1-5
Hat 2-3	Hat 2-3
Hat 2-4	Hat 4-5
Hat 2-5	Hat 2-4
Hat 4-5	Hat 2-5
Hat 3-4	Hat 7-9
Hat 7-9	Hat 3-4
Hat 6-13	Hat 7-8
Hat 9-14	Hat 10-13
Hat 6-12	Hat 9-14
Hat 6-11	Hat 6-11
Hat 13-14	<b>Hat 6-12</b>
Hat 10-11	Hat 9-10
Hat 9-10	Hat 13-14
Hat 12-13	Hat 10-11
Hat 7-8	Hat <b>12-11</b>

Tablo 4. Aktif güç kaybı ve şönt kapasite yerleşimi açısından 14 baralı test sistemi için karşılaştırmalı sonuçlar.

Eğriden	Duyarlılık indisinden
14	<b>14</b>
13	<b>13</b>
5	<b>12</b>
10	<b>10</b>
11	<b>11</b>
9	<b>4</b>
4	9
7	5
12	7

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada seri ve şönt kapasitif reaktif güç yerleşimi ile sistem aktif ve reaktif kayıpları arasındaki ilişki üzerinde durulmuştur. Eğer sistemde kapasitif reaktif güç yerleşimi için uygun yerler belirlenmeye çalışılıyorsa amaçlar ile uygun olan duyarlılık göstergelerini kullanmak uygun olacaktır. Ayrıca bu çok büyük sayıda bara ve hatta sahip sistemlerde zaman tasarrufu sağlayacak incelemeleri hızlandıracaktır.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] Shahidehpour, S.M., ve Deeb, N.I., "An Overview of the Reactive Power Allocation in Electric Power Systems," *Electric Machines and Power Systems*, pp. 495-518, 1990.
- [2] Venkataramana, A., Carr, J., ve Ramshaw, R.S., "Optimal Reactive Power Allocation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-2, No.1, pp. 138-144, February 1987.
- [3] Mutlu, A.A., ve Makram, E.B., "Analysis of Series Compensation from Different Aspects", *Proceedings of the 1998 IEEE SOUTHEASTCON Conference*, Orlando, FL, USA, pp. 100-104, 1998.
- [4] Anderson, P.M., ve Farmer, R.G., *Series Compensation of Power Systems*, PBLSH Inc., 1996.
- [5] Pai, M.A., *Computer Techniques in Power System Analysis*, TATA McGraw-Hill Publishing Company Limited, Third Reprint, 1984.
- [6] Elrazaz, Z., ve Al-Ohaly, A., "Criterion for Inductive Compensation Location to Enhance System Steady State Stability," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 8, No. 4, pp. 1545-1549, November 1993.
- [7] Savulescu, S.C., "Qualitative Indices for the System Voltage and Reactive Power Control," *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-95, pp. 1413-1421, July/August 1976.
- [8] Bağrıyanık, M., *Enerji İletiminde denli Kararlı En Uygun Reaktif Güç Desteklemelerinin İncelenmesi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 1997.