

# ANAHTARLAMA SÜREKSİZLİKLERİ SEBEBİYLE OLUŞAN TRANSFORMATÖR ARIZALARININ ANALİZİ

<sup>1</sup>Nihat DİLER

<sup>1</sup>nihat.diler@schneider-electric.com

<sup>1</sup>Schneider Elektrik

TOSB Organize Sanayi Bölgesi

<sup>2</sup>Özgür KARACASU

<sup>2</sup>karacasu@gyte.edu.tr

<sup>2,3</sup>Elektronik Mühendisliği Bölümü

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

<sup>3</sup>M. Hakan HOCAOĞLU

<sup>3</sup>hocaoglu@gyte.edu.tr

## ÖZET

Devre kesicileri sebebiyle oluşan aşırı gerilimler uzun yıllardır iyi bilinen bir olay olmasına rağmen bu olgunun orta gerilim tesislerinde ortaya çıkması nispeten yeni karşılaşılan bir durumdur. Anahtarlama aşırı gerilimleri olarak bilinen bu olguyla geçtiğimiz yıllarda bir hafif raylı taşıma sisteminin DC besleme transformatörlerinde karşılaşılmıştır. Bu bildiriye karşılaşılan problemin tanımı, nasıl analiz edileceği ve alınması gereken tedbirler kısaca anlatılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Aşırı gerilimler, Kesiciler, EMTP, Parafudr.

## 1. Giriş

Ülkemizde orta gerilim tesislerinde yaygın olarak tam kapalı SF6 gazlı kesiciler kullanılmaktadır. Bilinmektedir ki bir elektrik devresinde yer alan kesiciler açma/kapama yaptığı anda ortaya çıkan geçici durum sistemde aşırı gerilimlerin oluşmasına sebep olabilmektedir. Ortaya çıkan bu aşırı gerilimler anahtarlamanın normal olmaması durumunda çok büyük değerlere ulaşabilmektedir. Anormal anahtarlama açma esnasında akım kesilmesi, kapama esnasında ise öntutuşma şeklinde isimlendirilmektedir. Kesilmeden sonra yeniden tutuşma ve kesilme, kapamadan sonra ise kopma ve yeniden tutuşma sistemdeki gerilimleri çok büyük değerlere sürükleyebilmektedir [1]. Bir hafif raylı taşıma sisteminde kuruluşundan beri belli postalarda kullanılmakta olan kuru tip transformatörlerde yüksek oranda bozulma görülmektedir. Yüksek gerilim sargılarında, sargı uçlarına yakın ve izolasyon delinmesi şeklinde kendini gösteren bu bozulmalar genellikle transformatörlerin yüksüz olduğu gece geç saatlerde meydana gelmektedir [2].

Elektrik sistemi 34.5 kV orta gerilimden geniş bir kablo şebeke ile beslenmektedir. Her bir transformatör postası uzun bir kablo hattı sonunda yer almaktadır. Redresör sistemini beslemek için kullanılan transformatörlerin primer tarafı üçgen, sekonderleri ise yıldız ve üçgen bağlanmış iki ayrı sargıdan oluşmaktadır.

Sistem kapalı bir kablo şebekesi olduğu için atmosferik deşarj beklenmemekte ve bu nedenle transformatörlerin temel izolasyon seviyeleri (**BIL**, *Basic Insulation Level*) genellikle yüksek seçilerek ilave bir darbe gerilim koruması yapılmamaktadır. Sistemdeki mevcut transformatörler için temel izolasyon seviyesi 170 kV olarak belirlenmiş ve test edilmiştir [3]. Kurulduğu tarihten buyana sistem transformatörlerinde çok sayıda arıza rapor edilmiştir.

Rapor edilen arızalar genellikle benzer karakterli olup, literatürde yeni rapor edilmeye başlanan anormal anahtarlama aşırı gerilimleri ile uyumlu olduğu görülmüştür [4],[5]. Konuyla ilgili yeni bir IEEE standardının hazırlanmakta olduğu rapor edilmektedir [6]. Şekil 1'de hasar görmüş bir transformatör görülmektedir.



Şekil 1: Hasar görmüş bir transformatör.

Bu bildiriye kesici anomalilerini analiz etmek için kullanılan metod anlatılarak temsili sonuçlar verilecektir. Yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde, anormal anahtarlama şartları altında, nominal gerilimin 8 ila 10 katı daha yüksek değerlere çıkan gerilimlerin sistemde oluştuğu görülmüştür. Çalışmanın özelliği sebebiyle geliştirilen çözüm ve uygulama neticesinde alınan sonuçlar sunum esnasında gösterilecektir.

## 2. Aşırı Gerilimler

Güç sistemlerinde görülen aşırı gerilimlerin temel sebebi, özellikle geleneksel havai hatlar için, ağırlıklı olarak atmosferik olaylardır. Bununla beraber anahtarlama ve muhtelif arızalar da aşırı gerilimlerin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir [1]. Literatürde konuyla ilgili çok sayıda çalışma bulunmakta ve bu çalışmaların sonuçlarına dayanarak aşırı gerilim faktörü 3 - 5 pu değeri arasında değişen sistemler inşa edilmektedir [7]. Bu seviye cihazların temel izolasyon seviyesi, BIL, olarak isimlendirilir. Ancak sistemde BIL ile belirlenen seviyenin üstünde gerilimlere çeşitli sebeplerle rastlanabilmektedir.

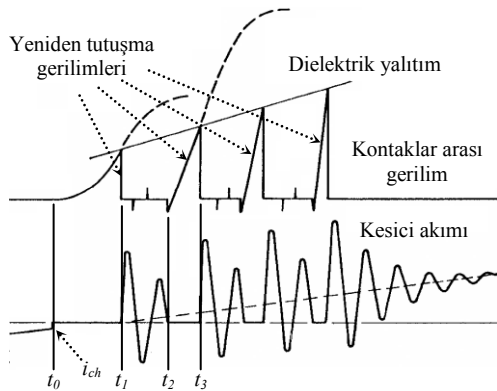
Dağıtım sistemleri genellikle gömülü kablo hatlarından oluştuğu için atmosferik olayların etkisinde değildir. Dolayısıyla ortaya çıkan aşırı gerilimler esas olarak anahtarlama veya arıza kaynaklıdır. Anahtarlama esnasında oluşan aşırı gerilimler ideal bir

anahtarlar simüle edildiği takdirde tamamen devre parametreleri ile belirlenebilir. Bu esnada sistemde bulunan hat endüktansı ve kapasitesi gibi enerji depolayan elemanlar, tanım bağıntıları gereği, gerilim veya akımdaki ani değişimin etkisi ile aşırı gerilimlerin ortaya çıkmasına sebep olurlar. Bu gerilim genlik olarak anma gerilimin birkaç katına kadar çıkabilir ve sistemin zaman sabitine bağlı olarak birkaç kHz'lik bir frekansla salınarak azalır.

Ancak anormal anahtarlama durumunda durum farklılık arz eder. Özellikle düşük genlikli indüktif akımın kesilmesi esnasında kesici içinde oluşan ark, kendini devam ettirecek kadar enerji taşımaz, kararsız hale gelir ve akım tabii sıfır noktasına ulaşmasından önce kesilir [8]. Kesilmiş akım (Chopped current) olarak bilinen bu akım, hızlı kesilmesine bağlı olarak çok yüksek aşırı gerilimlerin oluşmasına sebep olabilir [9]. Oluşan aşırı gerilim, kontaklar arasındaki elektrik izolasyon seviyesinden yüksekse ark yeniden tutuşur ve kesici iletime geçer. Düşük genliği ark akımı, kararlı olmadığı için hızla söner. İkinci kez sönen ark akımı, aşırı gerilimin çok daha fazla yükselmesine sebep olur. Birbiri ardına oluşan kesilme ve tutuşmaların, gerilimin nominal seviyesinin sekiz katına kadar yükselmesine sebep olduğu rapor edilmiştir [4].

Bir başka anahtarlama problemi de kapasitif karakterli yüklerin enerjilendirilmesidir. Kapasitif bir yük enerjilendirilirken kesici kontakları tam kapanmadan önce izolasyon, kontaklar arasında oluşan gerilime dayanamayarak, bir arka bozulur. Ön ateşleme (Prestrike) olarak bilinen bu olay neticesinde yüksek genlikli bir kapasitif akım kontaklar arasındaki boşluktan akar [10]. Şayet kontaklar arasındaki boşluk büyükse, akımın ilk sıfır geçişinde bu akım kesilir. Kesilme kesici uçlarındaki gerilimi artırır ve akım yeniden ateşlenir. Bu işlem gerilimin hızla yükselmesine sebep olur. Kesici uçlarındaki gerilim arttığı gibi yük uçlarındaki gerilim de izolasyon seviyesinin çok üstünde artabilmektedir. Ancak bu durum açma esnasında ortaya çıkabilecek aşırı gerilimler kadar büyük değerlere ulaşamaz.

Yukarıda özetlenen senaryoya göre, kontakların ayrılamaya başlamasının ilk birkaç milimetresindeki birden fazla yeniden tutuşmaya bağlı gerilim artışı ve kesiciden akmakta olan yüksek frekanslı akım Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: Yeniden tutuşma ve gerilim artışı

Konu iletim sistemlerinde uzun zamandır yaşanmakta olup literatürde bu sistemlerde karşılaşılan problemlerin çözümü ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar neticesinde yüksek gerilim tesislerinde kullanılan transformatör ve reaktörler özel anahtarlar ile açılıp kapatılmakta ve izolasyon seviyeleri yüksek tutulmaktadır. Konu ile ilgili kurulan çalışma gurubu dik cepheli aşırı gerilim olayını analiz etmek için kullanılacak olan metodları ve modelleme esaslarını standardize etmiştir [11]. Ancak dağıtım sistemlerinde ve orta gerilim seviyesinde henüz bir araştırma yöntemi standardize edilmemiştir. Konu ile ilgili kurulan çalışma gurubu ön raporları yayınlamış ancak kullanılacak modeller kesinleştirilmemiştir [6].

Bu aşırı gerilimlerin analiz edilebilmesi için kesicilerin ideal olmayan şartlarının modellenmesi gereklidir. Ancak kesilme ve yeniden tutuşma çok fazla parametreye bağlıdır ve önceden kestirilmesi güçtür. Kesici akımın erken kesilmesi; kontak materyallerinin cinsi ve şekli, kontaklar arasındaki mesafe, kontakların hızı, arkın meydana geldiği yanma hücrelerinin özellikleri, vakum içindeki gazın yapısı, basıncı, sıcaklığı ve bunların hepsinin zamanla yaşlanmasının yanı sıra kesilen akımın genliği ve açısı gibi dış devre parametrelerine de bağlıdır. Tek başına kesicinin detaylı modellenmesi analizlerin güvenilirliği için yeterli değildir. Kesici dışındaki devrenin ilgilenilen frekans aralığındaki davranışının da dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle devrede bulunan transformatör, besleme devresi ve hat modelinin frekansa bağımlılığı hesaba katılmalıdır.

### 3. SİSTEM MODELLEME

Aşırı gerilimlerin simülasyonu için ElectroMagnetic Transient Program (EMTP)'ın Alternative Transient Program (ATP) versiyonu kullanılmıştır [12]. Analiz edilen sistemin temel elemanları; besleme sistemi, kablolar, baralar, kesiciler ve transformatör olarak sıralanabilir.

Besleme sistemi başlıca iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar 154kV kaynak ve 154/34.5kV indirici merkezindeki besleme trafolarıdır. 154kV'luk kaynak kısa devre gücüne göre modellenmiştir. Besleme trafoları yıldız üçgen bağlı olup yıldız noktası 20 Ω direnç üzerinde topraklıdır. Bu transformatörler kesici dinamiğinde çok önemli bir yer tutmadığı için basit T eşdeğer modeli ile modellenmiş, boş çalışma kayıpları hesaba katılmış, manyetik doyma ihmal edilmiştir.

Hatların frekansa bağımlılığını hesaba katan bazı temel algoritmalar ATP içerisine gömülmüşlerdir. Bu algoritmalar modal analiz tekniği ile hesaba katılmaktadır. Ancak bu tekniklerin özellikle üç fazlı kabloların modellenmesinde kullanımı, propagasyon sabitinin küçük olmasına bağlı olarak nümerik entegral alma rutinlerinin çok küçük adımlara ihtiyaç duymasına neden olmaktadır. Bu da şu anki bilgisayar teknolojisi ile çözümü oldukça zorlaştırmaktadır. Ayrıca çok küçük adım aralığı nümerik osilasyona sebep olmakta ve sonuçların güvenilirliğini riske sokmaktadır. Alternatif hesap metodlarında biri de

kablolari kaskat bağı pi eşdeğer devre grubu halinde modellemektir. Kaskat bağı her pi eşdeğer devre gurubu, 50Hz ve 1MHz'lık 2 pi eşdeğer devrenin paralel bağlanması ile elde edilmektedir. Modelin hassasiyeti kaskat bağlanan gurup sayısına bağıdır. Çalışma esnasında muhtelif sayılar denenmiş ve en uygun sayı belirlenerek simülasyonlarda kullanılmıştır.

Genellikle birçok güç sistemi çalışmasında hesaplara katılmayarak etkisi ihmal edilen baralar, kesme esnasında ortaya çıkan yüksek frekanslı salınımların karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir. Kablolari ile kıyaslandığında, havada ve genellikle kapalı bir mekânda yer alan, lama şeklinde dikkörtgen kesitli elektrolitik bakırdan yapılmışlardır. Bu vasıflari dolayısıyla kendinden önceki ve sonraki elemanlardan elektriki özellikler bakımından önemli farklar gösterirler. Yapılan çalışmalar, baralar ihmal edildiğinde veya ihmal edilmeyip frekansa bağımlılığı dikkate alınmadığında sonuçların önemli ölçüde değiştiği, iyi bir hesaplama için baraların düzgün modellenmesinin şart olduğunu göstermektedir. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde dikkörtgen kesitli baraların devre parametrelerinin hesabına ilişkin çalışma bulunamamıştır. Bu nedenle dikkörtgen kesitli baralar yerine eşdeğer yuvarlak kesitli bara modeli kullanılarak eşdeğer devre parametreleri hesaplanmıştır.

Aşırı gerilim analizleri ilgili literatürdeki çalışmalar, kesicilerin ideal olmayan şartlarının modellenmesinin çok önemli olduğu göstermektedir. İncelenen çalışmalarda anahtarın ideal olmayan şartları, kesme akımı, kesici uçlarındaki gerilim, ark zamanı, yüksek frekans dayanımı ve devre parametrelerinden elde edilen bilgiler ile kontrol edilen adi anahtar, nonlinear zaman kontrollü direnç ve Thevenin eşdeğer devresi gibi devre elemanları kullanılarak modellenebilmektedir [4]. Bu çalışmada kontrollü adi anahtar modeli analizler için kullanılmıştır. Anahtarın simüle edilebilmesi için ATP yazılımında kontrol yeteneği sağlayan Model eklentisinden faydalanılmıştır.

Yukarda sıralanan parametrelerde kesme akımı, oluşması muhtemel aşırı gerilimlerin ana sebebi ve daha sonraki olayların temel tetikleyicisi olması vasıflıyla ideal olmayan anahtarın önemli parametrelerinden biridir. Konu ile ilgili deneysel sonuçlara dayalı çalışmalar ve bazı ampirik modeller bulunmaktadır. Bu çalışmada aşağıda detayları verilen model kullanılmıştır.

$$i_{ch} = a - b\hat{I} - c \log Z_N \quad (1)$$

Denklem 1 ile hesaplanan kesme akımı kontak materyaline bağı ampirik  $a$ ,  $b$ ,  $c$  katsayıları, devreden geçen akım ( $\hat{I}$ ) ve devrenin karakteristik empedansına ( $Z_N$ ) bağıdır.

Kesicinin akımı, kesme akımı ( $i_{ch}$ ) değerinin altına inerek koptuktan sonra kontaklar arasındaki gerilim artar ve kesici artan gerilime dayanmaya çalışır. Şayet kesicinin dayanma gerilimi kontaklar arasındaki gerçek gerilimden küçükse izolasyon delinir ve kesici iletme geçer. Kesici uçlarındaki gerilim simülasyon esnasında

kolayca hesaplanabilir. Ancak kesicinin dayanım gerilimi veya dielektrik kapasitesi birçok faktöre bağıdır. Bu faktörlerin en önemlisi kontaklar arasındaki mesafedir. Kesicinin dayanma gerilimi kontaklar arasındaki mesafenin karekökü ile ters orantılıdır. Ancak yapılan deneysel çalışmalar ilk birkaç milimetrede bu ilişkinin lineer olarak modellenebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada kesicinin dielektrik dayanımı ( $V_b$ ) Denklem 2'de verilen lineer bir ifade ile hesaplanmıştır.

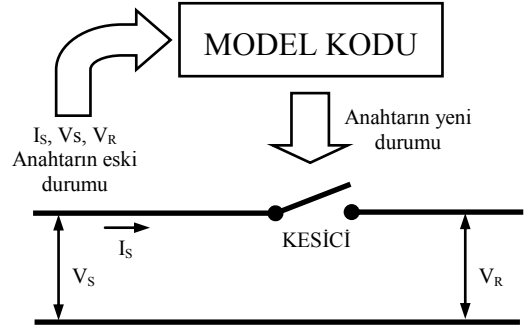
$$\bar{V}_b = A_A(t - t_0) + B_B \quad (2)$$

Denklem 2'de  $t$  ve  $t_0$ , sırasıyla simülasyon zamanını ve kesme komutunun verildiği zamanı;  $A_A$  ve  $B_B$  ise ampirik ifadenin katsayılarını simgelemektedir.

Kesici uçlarındaki gerilim kesicinin dayanabileceği ve ortalama değeri Denklem 2'ye göre hesaplanan değerden büyük olduğunda kesici içindeki ark yeniden tutuşacaktır. Bundan sonra kesicinin yüksek frekanslı akımı kesebilmesi, kesicinin ark söndürme kapasitesine bağıdır. Ark söndürme kapasitesi iki ampirik katsayı ve zaman fonksiyonu olarak Denklem 3'te verilmiştir.

$$\bar{di}/dt = C_C(t - t_0) + D_D \quad (3)$$

Şekil 3'de ideal olmayan anahtarın modeli görülmektedir. Anahtarın işlevini yerine getirebilmesi için probleme özel bir kodun geliştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 3 Kesici modeli

Hazırlanan kod sistemden geçen akımı, simülasyon zamanını ve anahtarın uçları arasındaki gerilimi okumakta ve kontakların hangi pozisyonda olacağını belirleyerek sisteme bildirmektedir. Nümerik çözüm esnasında her bir zaman aralığı için bu denetleme yapılmaktadır. Model program parçacığının belirleyeceği değer şu temel hususlara göre çalışmaktadır:

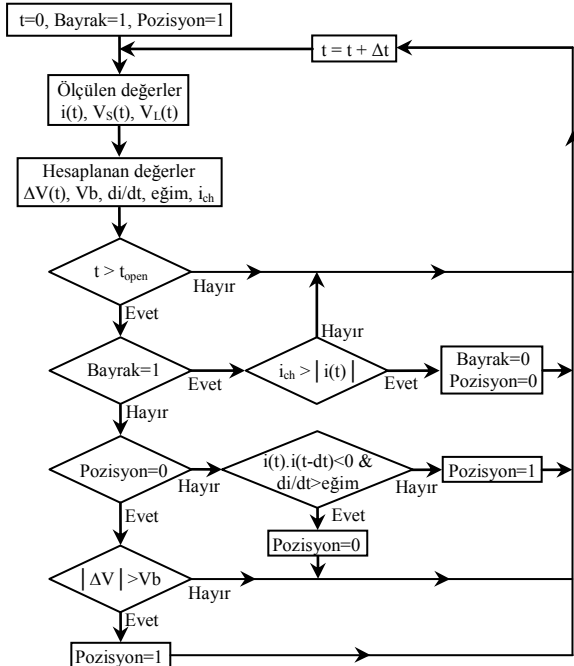
Anahtarları açmak için kontrol edilen değişkenler;

- Açma zamanı önceden belirlenen  $t_0$  değerinden büyük mü?
- Anahtar kapalı mı?
- Kesici akımı kesme akımından küçük mü?
- Yüksek frekanslı kesici akımının sıfır geçiş anındaki eğimi (türevi) hesaplanan kesme kapasitesinden büyük mü?

Anahtarları kapatmak için kontrol edilen değişkenler;

- Anahtar açık mı?
- Kesici uçlarındaki gerilim kesicinin dielektrik dayanımından büyük mü?

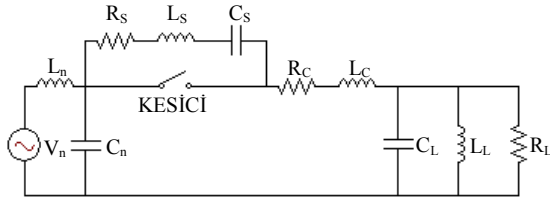
Bu kontrolleri yapacak olan programın akış diyagramı Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4: Yeniden tutuşma analizi için kullanılan kesici modelinin akış diyagramı

#### 4. SİMÜLASYONLAR

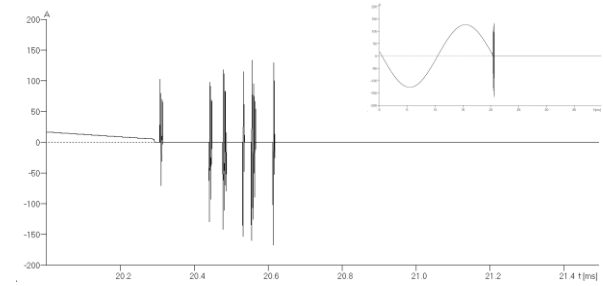
Bu bölümde geliştirilen ideal olmayan anahtar modeli denenecek ve sonuçlar literatür ile karşılaştırılacaktır. Anahtar simülasyonları için tek fazlı bir deney devresi kullanılmıştır. Şekil 5'da kesici modeli için kullanılan klasik deney devresi görülmektedir. Bu standart devre hem başarılı hem de başarısız açma işlemini simüle etme yeteneğinden dolayı tercih edilmiştir.



Şekil 5: Kesici modeli için deney devresi

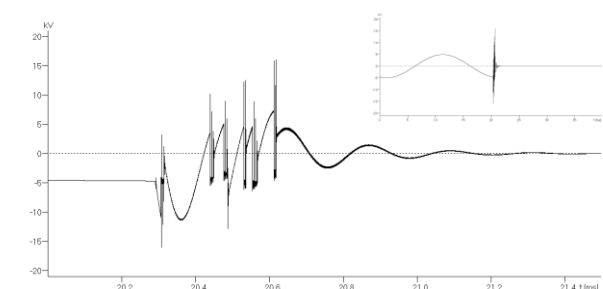
Deney devresinin parametreleri açık literatürden alınmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki geliştirilen anahtar modeli literatürle uyumlu olarak çalışmaktadır. 1, 2 ve 3 nolu denklemlerde verilen kesici parametreleri çeşitli risk değerlerinde modellenebilmektedir. Kesiciler yaşlandıkça veya en kötü durumu inceleyebilmek için risk değerleri artırılabilir. Düşük riskli olarak modellendiği takdirde açmanın başarılı olduğu Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen kesici akımı ve yük geriliminden görülmektedir. Her bir şeklin sağ üst köşesinde o büyüklüğe ait dalga şeklinin tamamı görülmektedir. Büyük şekilde ise işaretin problemlili kısmının detayı sunulmuştur. Bütün simülasyonlarda akım kesilmesi önceden belirlenen kesme değerine geldiğinde deterministik olarak kesildiği varsayılmıştır.

Kesici akımının sıfır geçişe yaklaşırken erken kesildiği, tamamı 1 ms'nin çok küçük bir parçasında gözlemlenebilen kesilme ve yeniden tutuşmaların ortaya çıktığı Şekil 6'den görülebilmektedir. Dielektrik dayanım yeterli olduğu için akım bir kaç tutuşmadan sonra kopmaktadır.



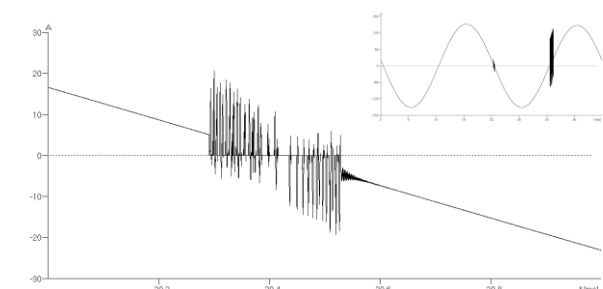
Şekil 6: Kesici akımı (düşük risk modeli).

Kesicinin bir kaç yeniden tutuşmadan sonra başarılı şekilde açma yaptığı, bununla birlikte yük uçlarındaki gerilimin nominal gerilimin iki katı değere çıktıktan sonra sıfır değerine düştüğü Şekil 7'den görülebilmektedir.



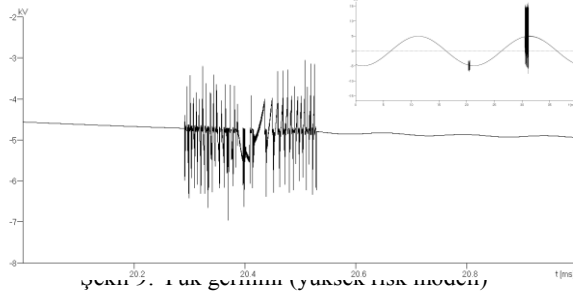
Şekil 7: Yük gerilimi (düşük risk modeli).

Şekil 8 ve Şekil 9'da ise yüksek riskli modellenmiş kesici ile yapılan açma işlemi sırasında kesici akımı ve yük gerilimi görülmektedir. Akım ilk tabii sıfır geçişte kesilmemekte ve iletimde kalmaktadır. İkinci alternansta akım yeniden kesilmekte ve yeniden tutuşma gerçekleşmektedir. Kesicinin ilk tabii sıfır geçişten sonra iletimde kalması kesicinin bozulduğunu göstermektedir. Kesici iletimde kaldığı için yük uçlarındaki ve kesici uçlarındaki gerilim çok yüksek değerlere çıkmamakta bununla birlikte akım kesme işlemi gerçekleştirilememektedir.



Şekil 8: Kesici akımı (yüksek risk modeli)

Şekil 9 incelendiğinde başarısız açma net olarak görülmektedir. Yük uçlarındaki gerilim çok yükselmekle beraber, açma başarısız olmuş, ilk tabii sıfır geçişten sonra dahi yük uçlarında vardır. Bu durum kesicinin iletimde kaldığını diğer bir deyişle bozulduğunu göstermektedir.



Simülasyonlar, gerçekleşen kesici modelinin sıhhatli çalıştığını, literatürle uyumlu sonuçlar ürettiğini, analizlerde rahatlıkla kullanılabileceğini göstermiştir.

Kesici modeli üç fazlı olarak gerçekleştirilerek 34.5kV seviyesinde gerçek bir sistem üzerinde iki farklı kesme zamanı ile denenmiş ve Tablo 1'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 1: Gerçek sistem sonuçları

Risk Tipi	Kesici Çıkış Gerilimi	Kesici Giriş Gerilimi	Kesici akımı
Yüksek	184kV	83kV	2910A
Yüksek	256kV	105kV	2015A
Orta	128kV	58kV	1680A
Orta	135kV	59kV	1693A

Sonuçlar incelendiğinde yük uçlarındaki gerilimin çok büyük değerlere ulaştığı görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Yapılan simülasyonlar incelendiğinde transformatör uçlarında ortaya çıkan aşırı gerilimin BIL seviyesinin çok üstünde olduğu ve zaman olarak klasik surge dalga şeklinden çok daha uzun bir süreye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu analizlerin her bir kesici, şebeke topolojisi, koruma sistemi konfigürasyonu gibi senaryolar için defalarca tekrarlanması ve olayın rastgele tabiatının değerlendirilmesi elzemdir. Burada sunulan sonuçlar bu simülasyonların yeterli hassasiyette yapılabileceğini göstermektedir. Transformatörlerin korunması için uygun ölçülendirilmiş parafudrların kullanılması tavsiye edilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasına katkılarından dolayı Ulaşım A.Ş. ve Schneider Electric'e teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- [1] Greenwood, A.: Electrical Transients in Power Systems, J. Wiley, 1991, New York,
- [2] Kaya, A.; Diler, N.: 'İstanbul Ulaşım A. Ş. GETİ Transformatör Arızaları Hakkında Rapor', (İç Rapor), 17.05.1995, Gebze.
- [3] IEC 60076-3: "Power Transformers Part 3: Insulation Levels, Dielectric Tests and External Clearances in Air", International Electrotechnical Commission, Publication Date: Mar 1, 2000.
- [4] Popov, M.; Van Der Suluis, L.: "Improved Calculations for No-Load Transformer Switching Surges", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 3, July 2001, pp. 401-408.
- [5] Shipp, D.; Dionise, T. J.; Lorch, V.; MacFarlane, B. G.: "Transformer Failure Due to Circuit Breaker Induced Switching Transients", Industry Applications, IEEE Transactions on, (will appear) doi: 10.1109/TIA.2010.2101996.
- [6] IEEE Working Group C57.142: "A Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformer and Breaker Switching Device Interaction", <http://www.transformerscommittee.org/subcommittees/performance/S06-SwTransientGuide.pdf>, (Erişim Tarihi: 07.03.2011)
- [7] Kimbark, E.W.; Legate A.C.: "Fault Surge Versus Switching Surge A Study of Transient Overvoltages Caused by Line to Ground Faults", IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol. PAS 87, No. 9, September 1968, pp. 1762-1769
- [8] Smeets, R.P.P.: "The Origin of Current Chopping in Vacuum Arcs", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol.17, No. 2, April 1989, pp. 303 – 310
- [9] Popov, M.: Switching Three Phase Distribution Transformer with a Vacuum circuit Breaker, analysis overvoltages and protection of equipment, PhD Thesis, Delft University of Technology, 2002
- [10]Fu, Y.H. Damstra, G.C.: "Switching Transients During Energizing Capacitive Load by a Vacuum Circuit Breaker", IEEE Trans. on Elect. Insulation, Vol. 28; No. 4, August 1993, pp. 657-665
- [11]Task Force on the Fast Front Transients of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group: "Modeling Guidelines for Fast Front Transients", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 11, No. 1, January 1996, pp. 493-506
- [12]ATP European User Group Website: [www.eeug.de](http://www.eeug.de), (Erişim Tarihi, 02.03.2011)).