

ELEKTRİKLİ DEMİRYOLLARINDA ENERJİ KALİTESİ PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

Bekir MUMYAKMAZ¹ Abdurrahman ÜNSAL² N. Serdar TUNABOYLU³

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi

Dumlupınar Üniversitesi, 43100, Kütahya

¹e-posta: mumyakmaz@dumlupinar.edu.tr ² e-posta: unsal@dumlupinar.edu.tr
³ e-posta: serdar.tunaboynu@dumlupinar.edu.tr

Anahtar sözcükler: Enerji Kalitesi, Elektrikli Demiryolu

ABSTRACT

Power quality issues for an electrified railway system are studied. A 30-km catenary line segment in Eskişehir - Karagözler transformer station has been chosen for this study. The field measurements show that the currently installed reactive power compensation system is quite adequate for reactive power limits imposed in Turkey. But, mains line current distortions are out of international standards. In the near future, increased railway traffic on the railways and the tighter THD limits imposed by European Union are very likely events to occur. To remedy for these foreseeable power quality problems, further probe for active power filter solutions are needed.

1. GİRİŞ

Elektrik enerji kalitesi; elektrik sistemlerinde artan nonlinear yük kullanımı dolayısıyla, elektrik dağıtım şirketleri, elektrikli cihaz ve ekipman üreticileri, ve son kullanıcılar arasında 1970'li yıllardan bu yana önemli bir konu haline gelmiştir. Genel olarak enerji kalitesi terimi; bir güç sistemindeki akım ve gerilimin ideal dalga şeklini bozan, geniş çaplı bir elektromanyetik etkileşim olarak tanımlanabilir. Üzerinde henüz tam olarak anlaşma sağlanmış olmamasına rağmen bu terim; Dugan tarafından, “Son kullanıcılara ait cihazların çalışmasını bozan veya yanlış çalışmasına sebep olan, akım gerilim veya frekansta meydana gelen herhangi bir sapma, enerji kalitesi problemidir” şeklinde açıklanmıştır [1]. Enerji kalitesinin diğer bir tanımı da IEEE Standart 1100-1992’de “Enerji kalitesi; hassas elektrikli cihazların, çalışma şartlarına uygun bir şekilde beslenmesi ve topraklanmasıdır” olarak yapılmaktadır [2]. En yaygın enerji kalitesi problemleri; gerilimde azalma (sag), gerilimde artış (swell), enerji kesintileri, gerilim ve faz dengesizlikleri, gürültü, modülasyon, frekans sapmaları, ve harmonik bozulmalardır.

Elektrik enerji kalitesi problemi; elektriğin ilk kullanıldığı günden bu güne kadar gündemde olmasına rağmen, yarı iletken güç elektroniği elemanlarının sıkça kullanılmaya başlanmasıyla birlikte hem enerji temin edicileri hem de kullanıcıları açısından artan bir öneme sahip olmuştur. Büyük çapta enerji kalitesi problemine yol açan tesisler arasında elektrik ark fırınları ve elektrikli demiryolları sayılabilir. Her iki örnekte de ağırlıklı olarak enerji kalitesi problemi olarak, reaktif güç gereksinimi ve harmonik akımlar başta gelmektedir.

Bu çalışmada elektrik enerji kalitesi problemine yol açan elektrikli demiryolu sistemleri incelemeye alınmakta ve çözüm önerileri üzerinde durulmaktadır.

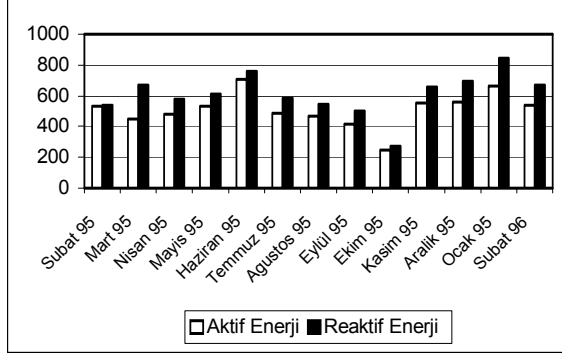
2. DEMİRYOLU VE ENERJİ KALİTESİ

Elektrikli demiryollarında ilk önceleri 1500 ve 3000 V luk doğru akım hatları kullanılıyordu. 1945 ten itibaren merkezi avrupa ve iskandinav ülkelerinde 15 kV, 16 2/3 Hz ve 25 kV, 50 Hz lik bir fazlı alternatif akım hatları kullanılmaya başlandı [3].

Demiryolu katener hattından alınan elektrik, kullanılan tahrik sisteminin ihtiyacına göre doğrultucu – inverter grupları yardımı ile doğru akım veya üç fazlı alternatif akıma çevrilir. Bu çevrilme sebebiyle katener hattından çekilen akım büyük miktarda harmonikler içerir. Ayrıca; bu tahrik sistemleri, katener hattından bazen aktif güçle aynı miktarda, bazende daha fazla olabilen endüktif reaktif akım çekerler. Enterkonnekte sistemden çekilen akımın harmonik bileşen içeriği ve reaktif güç miktarı; trenin ağırlığına, yolcu veya yük miktarına, hızına ve yerine bağlı olduğu gibi; trenin hızlanma, yavaşlama ve sabit hız gibi değişik çalışma modlarına da bağlı olup büyük oranlarda rasgele değişmektedir [4].

Ülkemizde elektrikli demiryolu cer sistemlerini besleyen katener hatları 25 kV bir fazlı AC hatlardır ve 154 kV luk enterkonnekte şebekeye trafoyla iki fazlı olarak bağlanmaktadır. Bu şekliyle demiryolu sistemi; enterkonnekte güç sisteminde

dengelessiz bağlı yük olarak yer almaktadır. TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları) trafo merkezlerinde kompanzasyon tesisi öncesi gc faktörünün değişimi aylık ortalaması 0.7 ila 0.82 arasındaydı [5]. Şekil 1' de Eskişehir-Karagözler trafo merkezinin Őubat 95 – Őubat 96 dönemi için aylık aktif ve reaktif enerji tüketimleri görülmektedir [6].



Şekil 1. Karagözler trafo merkezi yıllık enerji tüketiminin değişimi

Diğer bir durum da katener hattının yüksüz olduğu yani tren geçmediği anlar için söz konusudur. Katener hattı, yüksüz durum için hattın kapasitif reaktansı sebebiyle kapasitif akım çekmektedir.

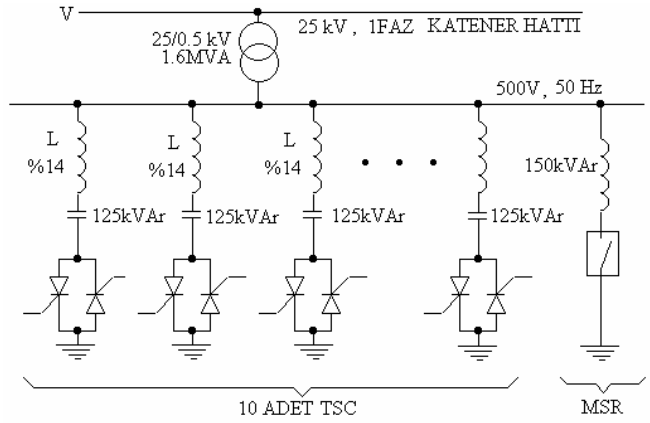
Reaktif gc gereksinimindeki bu denli değişim reaktif gc kompanzasyonunu zorunlu kılmıştır. TEAŐ (Türkiye Elektrik retim İletim Anonim Őirketi); aylık ortalam gc faktörünün 0.95in üzerinde olmasını ve reaktif enerji tüketiminin, aktif enerji tüketiminin %50 sini aşmamasını Őart koşmaktadır.

Bu hususlar dikkate alınarak; trafo merkezlerinin kompanzasyonunda, sabit kapasitör grupları (MSC) ve tristör anahtarlamalı kapasitör grupları (TSC) olmak üzere iki tip kompanzasyon kullanılmıştır. Sabit kapasitör grubu ile kompanzasyon Őehirler arası tren ve banliylrın birlikte bulunduğu büyük Őehirlerde yeterli görülmüş, tren trafiğinin daha az olduğu Őehirler arası hatların trafo merkezlerinde TSC grupları tercih edilmiştir.

Şekil 1 de aktif ve reaktif gc tüketim miktarları verilen Eskişehir – Karagözler trafo merkezinde, bir günde geçen tren sayısı azdır. Tren geçişleri esnasında katener hattından çekilen akım büyük oranda 3, 5 ve 7. harmonikleri içermekte ve toplam harmonik bozulma (THD) %30 seviyelerine ulaşmaktadır. Ayrıca; katener hattından çekilen aktif ve reaktif gcler Şebeke geriliminin her periyodunda bile büyük miktarlarda değişmektedir. Bu durumda mekanik yolla kondansatör gruplarının devreye alınarak çıkarılmaları yeterli olmamakta, tristrlerle kontrolü gerekmektedir. Öte yandan harmonik akımlarını azaltıcı düzenlemeler de zorunludur. Bu sebeplerle trafo merkezinde Şekil 2 de görülen kompanzasyon sistemi kullanılmıştır.

Sistemde, katener hattından alınan 25 kV luk enerji bir fazlı trafo yardımıyla 500 V seviyesine indirilmekte ve kondansatör gruplarına (TSC) bağlanmaktadır.

Kondansatrlere seri bağlanan reaktörler aracılığıyla 3. harmonik filtrelenmesi sağlanmaktadır. Katener hattında reaktif enerji miktarı bir periyottan diğerine bile büyük değişiklikler gösterdiğinden çok kademeli TSC kullanımı zorunlu olmuştur ve herbiri 125 kVAr lık 10 tane TSC kullanılmıştır. Sistemde ayrıca bir adet kesici ile devreye alınıp çıkarılan 150 kVAr lık reaktör bulunmaktadır. Bu reaktör tren geçmediği durumlar için devreye alınarak katener hattının çektiği kapasitif akımı kompanze etmektedir. Sistemin kontrolü gerçek zaman kontrol ve analiz cihazı (RTPF) ile yapılmaktadır. Bu kontrol ile TSC'lerin cevap zamanı en az bir periyotdur. Dolayısıyla reaktif enerji üretimi her periyotta bir ayarlanabilmekte; ancak kompanzasyon miktarının değişimi kademeli olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu yönüyle; sistem, aylık ortalam gc faktörünü istenen seviyede tutabilmektedir.



Şekil 2. Eskişehir-Karagözler Trafo Merkezi Kompanzasyon Sistemi

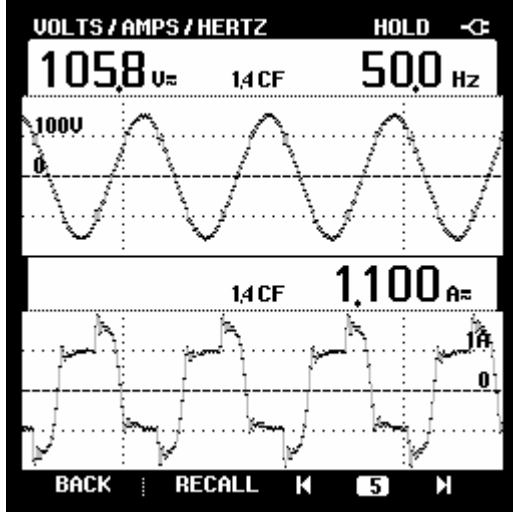
Tesis edilen sistemin enerji kalitesi açısından getirdiklerini test amacıyla Eskisehir – Karagözler trafo merkezinde ölçümler yapılmıştır:

3. ÖLÇÜMLER VE DEğERLENDİRME

Karagözler trafo merkezindeki ölçümler; öğle saatlerinde, Ankara - İstanbul seferini yapmakta olan Başkent Ekspresi geçişi esnasında Fluke 43B Harmonic Analyzer cihazı kullanılarak yapılmıştır. lm katener hattı gerilim ve akım trafoları aracılığıyla yapılmış olup; akım trafosu dönüştürme oranı 600:5, ve gerilim trafosu dönüştürme oranı ise 25000:100 dr. Ayrıca kompanzasyon sistemine kumanda eden RTPF cihazına ait ekrandan da gözlemlenme yapılmıştır.

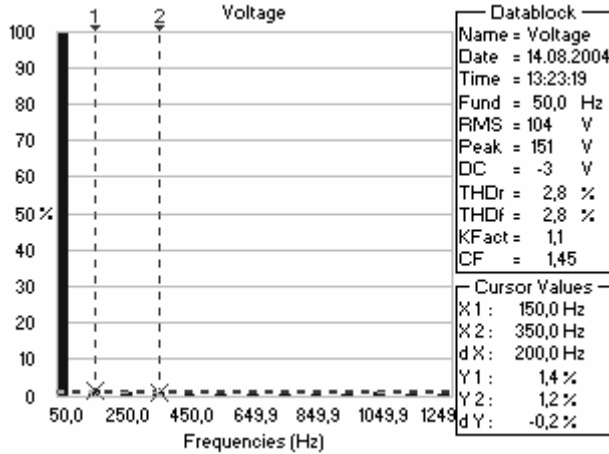
Treni besleyen katener hattı trafo merkezi çıkışında iki branşman halinde yaklaşık 30 km lik bir hattır. Dönüş akımı ise raylar aracılığıyla sağlanmaktadır. Katener hattından tren yükünün beslenmesi 20 - 30 dk kadar sürmektedir. Bu zaman aralığında tren değişik alışma Őartlarında seyrini devam ettirdiğinden (hızlanma, duruş, sabit hız, ve frenleme) katener hattından çekilen akımlar saniyeler içinde bile büyük değişimler göstermektedir.

Ölçme işlemi pek çok defa ve değişik bakış açılarından yapılmış ise de burada sadece bir - iki örnekle yetinilecektir. Şekil 3 te tren geçişi esnasında orta seviyede yükleme durumu için; katener hattının gerilimi ve akımına ait, dalga şekilleri görülmektedir. Katener hattının gerilimi; 25 kV nominal gerilim seviyesinin üzerinde, ve toplam harmonik bozulma (THD); Şekil 4 teki datablock' ta % 2.8 olarak görülmektedir.



Şekil 3. Katener hattı gerilim (üstte) ve akımı.

Katener hattı gerilim spektrumundan görüleceği gibi; değişik frekans bölgelerinde harmonik bileşenler mevcuttur, ancak THD seviyesi IEEE 519 numaralı standardının (% 5) altındadır [7].

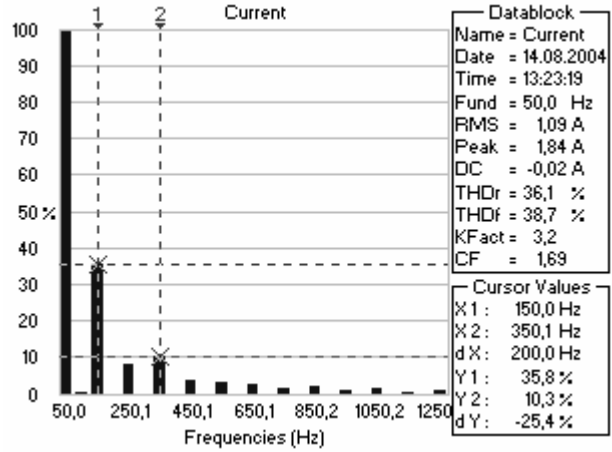


Şekil 4. Katener hattı gerilim spektrumu.

Akım spektrumu incelendiğinde durumun farklı olduğu görülür. THD seviyesi % 36.1 dir. Ancak akım

dalga şekilleri için THD' ye dayalı inceleme yanlış yönlendirmeye sebep olabilir. Ayarlanabilir hız sürücü devrelerinin çalışmalarında olduğu gibi; hafif yük durumlarında, akım THD değerleri çok büyük olmasına rağmen şebekedeki etkisi önemli olmayacaktır. Bu sebeple akımdaki dalga şekli bozukluğu değerlendirmesinde; IEEE standartlarında, Toplam Talep Gücü Bozulması (TDD) ve her bir harmonik akım bileşeninin yük akımı nominal değerine göre yüzdelik değeri ölçü olarak kullanılmaktadır. TDD; maksimum talep yük akımı olarak tariflenip, aşağıdaki formülde olduğu gibi hesaplanır:[1]

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}{I_L} * 100\% \quad (1)$$

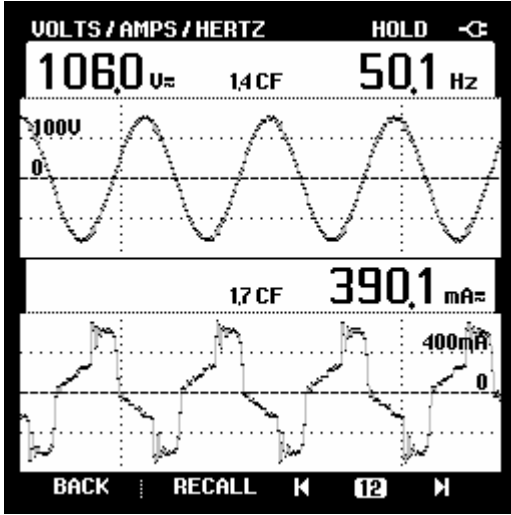


burada; I_L şebeke noktasında maksimum talep yük akımının temel bileşeni, ve I_h efektif manada I_h harmonik bileşenin genliği olmaktadır.

Şekil 5. Katener hattı akım spektrumu (Orta yük).

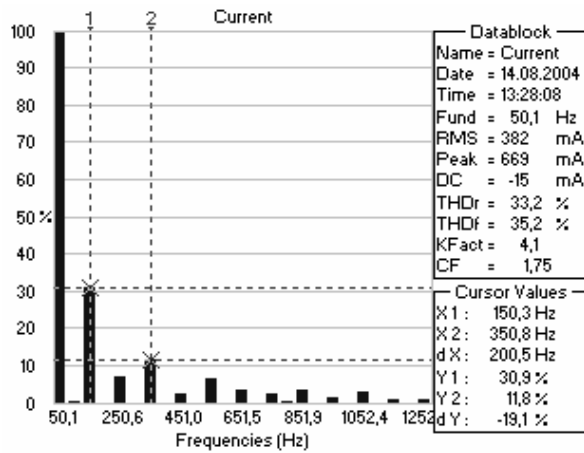
Karagözler istasyonunda şebekeye bağlantı noktasında kısa devre akımı 18.7kA; ve yük akımı ise tren sayısı ve yük durumuna göre 0-30A (154kV barasında) seviyesindedir. İstasyon besleme trafosu nominal gücü dikkate alınarak hesaplanacak maksimum talep akımı 28A olmaktadır. Şekil 5' te görülen akım dalga şeklini oluşturacak çalışma şartları için TDD hesaplanırsa, TDD=%27 civarında olduğu görülür.

Şekil 6 da hafif yük durumu için gerilim ve akım dalga şekli görülmektedir. Akım THD seviyesi %33.2 olup bir önceki durumla yaklaşık aynıdır. Ancak TDD için aynı şey söylenemez (TDD=%10).



Şekil 6. Katener hattı hafif yükte akım ve gerilim.

1992 yılında yayınlanan IEEE 519 numaralı standardında harmonik akım bozulma limitleri; şebekeye bağlantı noktasında, maksimum talep akımının yüzdesi olarak verilmiştir. Buna göre; şebeke geriliminin $69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$ aralığında olduğu ve I_{SC}/I_L oranının 100-1000 (Elektrikli demiryolu örneği) olduğu tesislerde, harmonik akım limitleri: 11. ve daha küçük harmonikler için %6; $11 \leq h < 17$ harmonikler için %2.75, $17 \leq h < 23$ harmonikler için %2.5, $23 \leq h < 35$ harmonikler için %1, $35 \leq h$ harmonikler için %0.5, ve toplam talep gücü bozulması TDD için %7.5 olarak belirlenmiştir [1].



Şekil 7. Katener hattı akım spektrumu (Hafif yük).

Orta ve hafif yük durumlarına ait akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 3 ve 6 da görülmektedir. Buradan anlaşılabilceği gibi gerilim dalga şeklindeki harmonik bozulma standartlarda verilen limitleri aşmamaktadır. Şekil 5 ve 7 de görülen akım dalga spektrumu incelendiğinde; her iki durum için de, IEEE 519 standardında verilen limitlerin aşıldığı anlaşılacaktır. Her iki akım dalga spektrumu için de 3. harmonik akım %30'un (Limit:%6), 7. harmonik

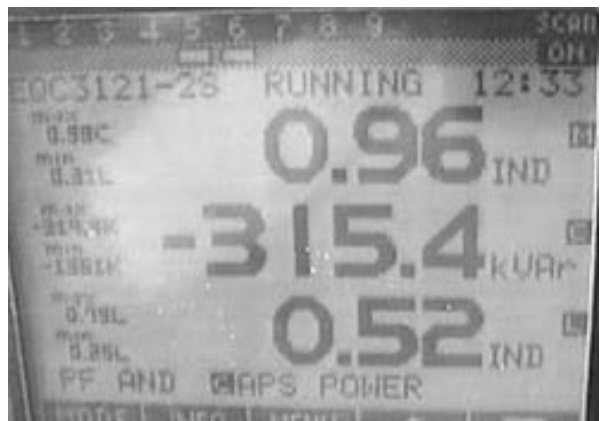
akım da %10'un (Limit:%6) üzerindedir. Ayrıca toplam talep gücü bozulması TDD % 7.5 ile sınırlandırıldığı halde; orta seviyede yük için $TDD = \%27$ ve hafif yük durumu için $TDD = \%10$ hesaplanmıştır.

Karagözüler trafo istasyonunda yapılan incelemeler sırasında; tesiste mevcut bulunan statik reaktif güç kompanzasyon sisteminin gösterge ekranından tren geçişi boyunca reaktif güç değişimi ve harmonik akımlar gözlemlenmiştir. Katener hattı reaktif gücü 0.5 -0.9 aralığında anlık olarak değişmektedir.

Şekil 8 de katener hattının orta seviyede yüklenmesi durumu için kompanzasyon sistemi göstergesi görülmektedir. Göstergeye göre katener hattı (L) güç faktörü seviyesi 0.68 endüktif; şebeke tarafı (M) güç faktörü seviyesi ise 0.98 endüktif olmaktadır. Bu sırada kompanzasyon sistemi 1284 kVar reaktif güç üretmekte olup, sistemin 5 kademesi devrededir (C). Hafif yük durumu için katener hattı (L) güç faktörü 0.52 endüktif ve şebeke (M) güç faktörü de 0.96 endüktiftir (Şekil 9). Devrede olan kapasitör grup sayısı ikiye düşmüştür.



Şekil 8.Trafo istasyonu güç faktörü (Orta yük).



Şekil 9.Trafo istasyonu güç faktörü (Hafif yük).

Kompanzasyon sistemi şebeke tarafındaki güç faktörü seviyesini 0.95 endüktifin üzerinde tutmak için ayarlanmıştır. Çoğu zaman bu seviye sağlanmaktadır. Ancak hafif yük durumlarında ve ani yük değişimleri durumlarında güç faktörü bazen 1.00 kapasitif bazen

de 0.93 endüktif gibi sınırların dışına taşabilmektedir. Bu durumun TEDAŞ açısından bir sakıncası bulunmamaktadır; aylık ortalama 0.95 endüktif yüklenme ve aktif gücün % 20'si oranında da kapasitif yüklenme sağlanması istenmektedir. Kompanzasyon tesisinin işletmeye alınmasından bu zamana kadar ortalama bazda sınırlar aşılmamıştır. Dolayısı ile reaktif güç bakımından enerji kalitesi problemi çözümlenmiştir.

Harmonik bozulma değerleri açısından incelendiğinde; Karagözler trafo merkezinin gerilim dalga şekli THD oranlarının standartlarda belirtilen sınırların altında kaldığı görülür. Akım dalga şeklindeki bozulmaların ise; sınırları aştığı, tespit edilmiştir. Ancak ülkemizde harmonik bozulma sınırlarını belirleyici düzenlemeler ve yaptırımlar şu an için yürürlükte bulunmadığından bu durum problem teşkil etmemektedir.

Gelişen teknoloji ve güç elektroniği cihazlarının daha çok kullanılmasıyla birlikte gündeme gelecek enerji kalitesi hassasiyeti bu tür enerji kalitesi problemlerine de çözüm arayışlarını birlikte getirecektir. Şimdiden elektrikli demiryollarının harmonikli akım problemlerini gidermede kullanılacak mevcut ve geliştirilebilecek tekniklerin araştırılması gerekmektedir.

Harmonikleri kontrol etmenin üç temel yolu vardır: Yük tarafından oluşturulan harmonik miktarını azaltmak; sisteme harmonik girişini veya çıkışını filtre bağlayarak önlemek, veya filtreler, endüktörler ya da kondansatörler kullanarak sistemin frekans cevabını modifiye etmek.[1]

Elektrikli demiryolları açısından bakıldığında bu metodlardan birincisi, yük olarak mevcut tren altyapısı bulunduğundan pek mümkün gözükmemektedir. Bunun yerine ikincisi yani filtre kullanımı daha uygundur. Bu uygulama ya lokomotif içinde veya trafo istasyonunda yapılabilir. Lokomotif içinde yer darlığı sebebiyle ve her trene yerleştirme zorunluğu sebebiyle teknik ve ekonomik açıdan tercih edilmeyebilir. Dolayısıyla trafo merkezlerine filtre konulması daha pratik olacaktır. Ancak yük durumu sürekli değiştiği için pasif filtre yerine aktif filtre seçeneği tercih edilmelidir. Ayrıca; ileriye yönelik çözüm olarak; lokomotiflerin tahrik sistemleri dizayn edilirken, şebekeden sinüsoidal yakın akım çeken ve reaktif güç gereksinimi olmayan güç elektroniği sürücü devrelerinin kullanılması iyi bir çözüm olacaktır.

4.SONUÇLAR

Yapılan çalışmada TCDD elektrikli demiryolu istasyonlarında meydana gelen enerji kalitesi problemleri ortaya konulmuş ve çözüm önerileri tartışılmıştır. Uygulama sahası olarak Eskişehir

Karagözler Trafo İstasyonu ele alınmıştır. Yapılan incelemelerde; mevcut sistemin, TEDAŞ tarafından istenilen sınırlar içerisinde çalıştığı tespit edilmiştir. Sistemin 154kV'luk enterkonekte şebekeden beslendiği ve dolayısıyla çevrede bulunan diğer yüklere enerji kalitesi açısından bugün itibarıyla sakınca oluşturmadığı gözlenmiştir. Ancak gelecekte uygulamaya konulacak uluslararası standartlar çerçevesinde; harmonik akımlar bakımından sistemin istenilen performansı sergileyemeyeceği dikkate alınarak istasyonlarda aktif filtre kullanımının gündeme gelebileceğini gözden uzak tutmamak gerekir. Ayrıca ileriye yönelik olarak; elektrikli lokomotif imalatı çalışmalarında, yeni teknoloji ürünü sürücü devrelerinin kullanılması gündeme gelmelidir. Diğer yandan artan demiryolu yolcu sayısı ve trafiği de dikkate alınarak yapılacak tren seferlerinin zamanlaması ayarlanırken, trenlerin istasyonlarda meydana getirecekleri enerji kalitesi problemleri de dikkate alınmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada gerek doküman, gerekse teknik bakımdan yardımlarını esirgemeyen tüm TCDD personeline teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKLAR

- [1] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. and Beaty, H.W. *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 1996.
- [2] Bollen, M.H.J. *Understanding Power Quality Problems*, IEEE Press, 2000.
- [3] Heinz KURZ, "Rolling Across Europe's Vanishing Frontiers", IEEE Spectrum, Feb. 1999, PP 45-49
- [4] L.A Snider, E. Lo, T.M. Lai, "Stochastic Power Quality Study of Distribution Supply to Metro Transit Railway", IEEE Conference on Power Quality, 2001
- [5] TCDD Reaktif Güç Kompanzasyonu Teknik Şartnamesi, 1996
- [6] Mumyakmaz, B. "Elektrikli demiryolu Katener Hatlarının Kompanzasyonunda Statik Var Kompanzatorlerinin kullanılması.", DPU FBE Dergisi, 2000, Sayı 1
- [7] IEEE Standard 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.