



İstanbul'da Bir Raylı Sistem Tesisi'ne Ait Harmonik Analizi ve Çözüm Önerileri

Pelin Fidan¹, Hüseyin Akdemir^{1*}, Bedri Kekezoğlu¹, İsmail Adıyıl²

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul-Türkiye

² Metro İstanbul Anonim Şirketi, İstanbul-Türkiye

(İlk Geliş Tarihi 6 Ağustos 2018 ve Kabul Tarihi 23 Kasım 2018)

(DOI: 10.31590/ejosat.451124)

Öz

Demiryolu taşımacılığının talep artışı nedeniyle yayılımı, hem yolcu hem de yük naklindeki sayısız avantajından dolayı zamanla ivmelenmiştir. Trafik sıkışıklığını gidermesi, yüksek kapasitede yolcu ve yük taşınabilmesi, konfor, yüksek hız ve güven sağlanması gibi birçok avantajı bulunan raylı ulaşım sistemleri, Türkiye'de de önemli bir yer edinmiştir. Bu avantajlarının yanında her geçen gün önemi ve yayılımı giderek artan raylı sistemlerin elektrik şebekesi üzerine istenmeyen bir takım olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Bu çalışmada, raylı sistemlerde karşılaşılan en önemli güç kalitesi problemlerinden olan harmonikler üzerine yoğunlaşmıştır. Gerçek raylı sistem verileri doğrultusunda, bilgisayar ortamında model oluşturulmuş ve bu modelin harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Model ETAP programı üzerinde oluşturulmuş ve yük akışı ile harmonik analizleri sonuçları gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak modelin yüksek doğrulukla çalıştığı ispatlanmıştır. Sonrasında sistem üzerindeki harmonik probleminin çözümüne yönelik öneriler getirilmiş, bu öneriler simülasyon ortamında denenmiş ve önerilen çözümler ile harmonik sorunun hangi oranda giderildiği elde edilen bulgular ile sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemler, güç kalitesi, harmonikler, ETAP.

Harmonic Analysis and Solution Suggestions for a Railway System in Istanbul

Abstract

The expansion of railway transport due to demand growth has accelerated over time due to the numerous advantages of both passenger and cargo. Resolve traffic congestion, can be carried in passenger and cargo capacity, comfort, speed and confidence with many advantages such as the provision of rail transport systems, has acquired an important place in Turkey. In addition to these advantages, there are some undesirable negative effects on the electric network of the railed systems, which are increasing in importance and spread every passing day. In this work, the most important problems encountered in rail systems are concentrated on harmonics, which are quality problems. In the direction of realistic system data, a model is created in computer environment and harmonic analysis is performed. The model is built on the ETAP program and it is proved that the model works with high accuracy by comparing the results of the load flow and harmonic analysis with the actual measurement results. Subsequently, proposals have been made for solving the harmonic problem on the system. These suggestions have been presented in the simulation environment with the solutions that have been tried and proposed and the findings on which harmonic problem has been eliminated.

Key words: Railway systems, power quality, harmonics, ETAP.

¹ Sorumlu Yazar: Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul-Türkiye, hakdemir@yildiz.edu.tr

1. Giriş

Raylı sistemler, yapıları ve gelişmiş bir şebeke ağına sahip olmaları nedeni ile güç kalitesi parametreleri üzerinde ciddi etkileri olan yükler olarak sayılabilmektedir. Bu etkilerin en başında da harmonik bozulmalar gelmektedir. Çünkü harmonik bozulmaların neden olduğu etkiler sonucunda sistemde aşırı ısınmaların meydana gelmesi, trafo ile hatlarda ekstra kayıplar, röle gibi koruma ekipmanlarının arızalanması veya istenilen şekilde koruma yapamaması, generatörlerde titreşim ile gürültü oluşması ve sistemin kararsızlığı gibi istenmeyen durumlar ile karşılaşmaktadır (Jafarikaleybar vd., 2016). Bu etkileri azaltarak güç sistemini daha kararlı hale getirebilmek amacıyla her geçen gün bilim insanları birçok çözüm yöntemi sunulmakta ve pratiğe aktarılmaktadır. Dolayısıyla literatürde raylı sistemlerin elektrik şebekesine harmonikler yönüyle etkileri ve bunların ortadan kaldırılmasıyla ilgili bir takım çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalar da genel olarak farklı güç dönüştürücülerinin kullanılması ya da farklı filtre tasarımlarının kullanılması durumunda harmonik içerikteki azalmanın analizi üzerine yoğunlaşmıştır.

Farklı yapıdaki trafoların harmonikler üzerine etkisi incelendiğinde, ortak fazlı CER sisteminde uygun bir IM transformatörü ile bir AC-DC-AC kompansatörü kullanıldığında yük akımının toplam harmonik bozulmasının 38.33% değerinden 4.73% değerine indiği ve IM trafosunun diğer özel bağlantılı trafolardan üstün olduğu gözlemlenmiştir (Fathima ve Karthikeyan, 2016). Diğer taraftan, aynı sistem için kompanzasyon stratejisinin değiştirilmesiyle birlikte de harmonik içeriğin elemine edilebileceği sonucuna varılmıştır (Antonopoulos vd., 2016; Zhang vd., 2016; Song vd., 2016). Bu tür çalışmaların temel çıkışı noktası harmonik akımların oluşma sebepleri ile kurguladıkları kompanzasyon mekanizmalarının analizidir. Bu doğrultuda V/v bağlantılı (açık üçgen bağlantılı) bir CER güç kaynağı sisteminde demiryolu statik güç kondisyoneri (RPC) kullanılıp farklı kontrol stratejileri belirlenmiş, önerilen stratejiler analiz, simülasyon ve deneylerle doğrulanmıştır.

Filtre tasarımı konusunu ele alan (Yousefi vd., 2017) hibrit bir filtre yapısı tasarlanmış, 25 kV'luk bir sistem üzerinde simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Önerilen modelin sadece sistemin toplam harmonik bozulmasını (THB) azaltmakla kalmadığı aynı zamanda demiryolu ilk hareketi için gerekli olan reaktif gücü de kompanze ettiği görülmüştür. Benzer şekilde (Hu vd., 2015) tarafından bir Hibrit Güç Kalitesi Kontrol Sistemi (HRPQC) tanıtılmıştır. HRPQC'nin en belirgin özelliği hibrit kompanzasyon şemasını adapte ederek ana transformatörün olduğu aktif sisteme, diğer düşük güçlü yüksek frekanslı trafolarla gerek duyulmadan entegre olabilesidir. Önerilen sistemin harmonik bastırma mekanizması ve rezonans karakteristikleri incelenmiş, simülasyon ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile sistemin maliyet, alan ve kurulum açısından etkinliği doğrulanmıştır. Bu sistemin gelişmiş bir versiyonu (Lao vd., 2015) tarafından tasarlanmış ve bu yeni tasarım ile ilk maliyetler ve anahtarlama kayıplarının da azalacağı öngörülmüştür. Gelişen teknolojiyle birlikte farklı filtre tasarımları ile harmonik içeriklerin istenilen ölçüde düşürülmesine teknik olarak imkan sağlayan çalışmalar mümkün olmuştur (Roudsari vd., 2016; Wang vd., 2017; Pang vd., 2016).

Literatürde yer alan bu çalışmalardan hareketle, Türkiye'de

raylı ulaşım sistemlerinin en yoğun şekilde kullanıldığı İstanbul'da da, bu sistemlerin elektrik şebekesine olan etkisinin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen bu çalışmayla birlikte Metro İstanbul A.Ş.'ye ait gerçek bir raylı sistem merkezi ele alınarak güç kalitesi bakımından analiz edilmiştir.

Sistem, ETAP yazılımı üzerinde gerçek değerler baz alınarak modellenmiş ve elde edilen sonuçların gerçeğe yakınlığı incelenmiştir. Modelin yüksek doğrulukla sonuç verdiği görüldükten sonra harmonik analizi yapılmış ve kullanılacak iki farklı yöntem aracılığı ile ele alınan güç kalitesi probleminin önemli bir ölçüde giderileceği öngörülmüştür. Önerilen yöntemler de ETAP programındaki model üzerinde denenmiştir.

2. Raylı Sistemlerde Harmonikler

Raylı ulaşım sistemi özelinde ele alındığında, harmonik bozulmalara neden olan ekipmanlar doğrusal olmayan yükler, CER transformatörleri, darbeli doğrultucular, aydınlatma ve turnike sistemlerinde yoğun olarak kullanılan elektronik kartlar olarak gösterilebilir.

Günümüzde özellikle kent içi ulaşımında önemli bir rol oynayan raylı sistemlerin, elektrik dağıtım şebekesine bir takım olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Bu etkilerin başında da harmonik bozulmalar gelmektedir. En genel haliyle harmonikler, doğrusal olmayan yüklerin varlığı nedeniyle gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüzoidal formdan saparak bozulması olarak tanımlanır. AC sistemdeki bu harmonikler, temel frekansın tamsayı katında oluşan ve temel dalga formundan daha az genliğe sahip olan bileşenlerdir. Bu nedenle hem gerilim hem de akımın dalga şeklindeki bozulmalara bağlı olarak gerilim ve akım için ayrı ayrı harmonik analizleri yapılabilir. Ancak elektriksel yüklerin şebekeden çekilen akımın dalga şekli üzerine doğrudan etkisi vardır. Bu nedenle sisteme bağlanan yüklerin, harmonikler açısından şebekeye etkileri incelenirken, yüklerin çektiği akımlar esas alınarak analiz yapılır. Bu doğrultuda, bu çalışmada ele alınan tesisin akım harmonikleri dikkate alınmıştır.

Matematiksel olarak akım harmonikleri için Fourier serisi yardımı ile,

$$i(t) = i_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (\sqrt{2} I_n (\sin n\omega t + \phi_n)) \quad (1)$$

eşitliği yazılabilir. Burada, ω açısal frekansı, n harmonik mertebesini, i_0 akımın DC bileşenini, I_n ile ϕ_n ise sırasıyla n . harmonik akım bileşeninin efektif değeri ile faz açısını göstermektedir. Bölüm 2.1'de genel olarak harmonikler ile ilgili tanımlamalar ve bu tanımlamalarla ilgili standartlara yer verilmiştir.

2.1 Harmonik Limitleri

Güç sistemi üzerindeki harmonik bozulmanın miktarı "Toplam Harmonik Bozulumu (THB)" ve "Toplam Talep Bozulumu (TTB)" kavramları ile ifade edilmektedir. Akım harmonikleri için bu tanımlamalar sırasıyla Eşitlik (2) ve (3) ile verilebilir (EPDK, 2017);

$$THB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

Çizelge 1. Akım harmoniklerinin ve TTB değerlerinin yüzdesel olarak sınır koşulları

Tek Harmonikler						
I _{sc} /I _L *	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TTB
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerin %25'i ile sınırlanmıştır.

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_L} \quad (3)$$

Bu eşitliklerde ifade edilen I_L parametresi, maksimum yük akımı olarak tanımlanmaktadır. I_L değerinin, pratik uygulamada nasıl belirleneceği TTB ile THB değerlerinin hangi sınırlar içerisinde kalacağı ülkemizde şebekeye bağlı yüklerin tabi olduğu Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışı'na İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği'nde atıf yapılan IEEE 519-1992 numaralı standartta belirtilmiştir (EPDK, 2017; IEEE, 1992). Bu standarda istinaden I_L , ölçülen ana bileşen akımının efektif değerinin 15 veya 30 dakikalık ortalamaların maksimumu şeklinde tanımlanmıştır. Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği'nde, hem harmonik dereceleri için, hem de TTB bozulumu için sınır değerler tanımlanmıştır. Bu değerler Çizelge 1'de sunulmuştur. Çizelge 1'de belirtilen sınır değerleri tek sayılı harmonikler için verilmiş, çift sayılı harmonikler ise kendilerinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerin %25'i ile sınırlanmıştır. Harmonik ölçümler için yapılan değerlendirmelerde, dağıtım şebekesi ile kullanıcı arasındaki elektriksel bağlantı noktası ortak bağlantı noktası (PCC) olarak ifade edilir. Tablo 1'de ifade edilen I_{sc} parametresi de PCC'ye ait kısa devre akımı olarak tariflenir.

Harmonik sınırları ile ilgili bir diğer önemli nokta da Çizelge 1'de belirtilen sınır koşullarının aşılmasına Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği'nde atıf yapılan IEEE 519-1992 standardında belirli sürelerde izin verilmektedir. Şöyle ki, IEEE Std.519-1992 standardı belirtilen sınır değerlerin, normal işletme koşullarında sürekli olarak 1 saatten (60 dakika) fazla geçilmesini ve normal işletme koşulları haricindeki kısa süreli geçici (anlık) durumlarda ise sınır değerlerin 1,5 katının aşılması gerektiğini tavsiye etmektedir. Dolayısıyla, uygulamada yapılacak olan harmonik analizlerinde bu duruma göre bir değerlendirme yapılması gerekmektedir.

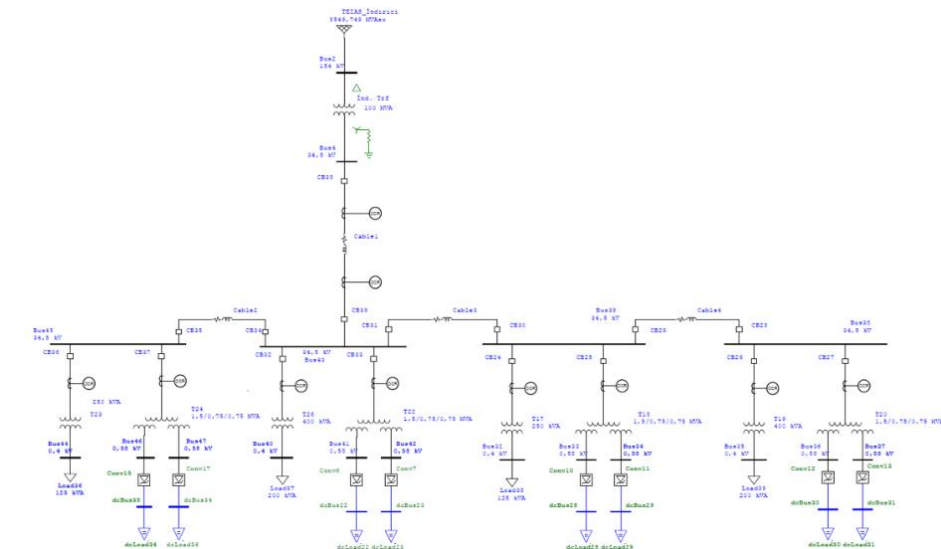
3. Gerçek Bir Raylı Sistem Tesisinin Modellenmesi ve Harmonik Analizi

Bu bölümde ETAP programından faydalanılarak, bir raylı sistem istasyonunun gerçeğe uygun olarak modellenmesi, harmonik analizinin yapılarak, darbeleri doğrultucuların darbe sayısının değiştirilmesi ve harmonik filtre eklenmesi yöntemlerinin, mevcut raylı sistemin harmonik bozunumu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.1 Sistem Modellenmesi

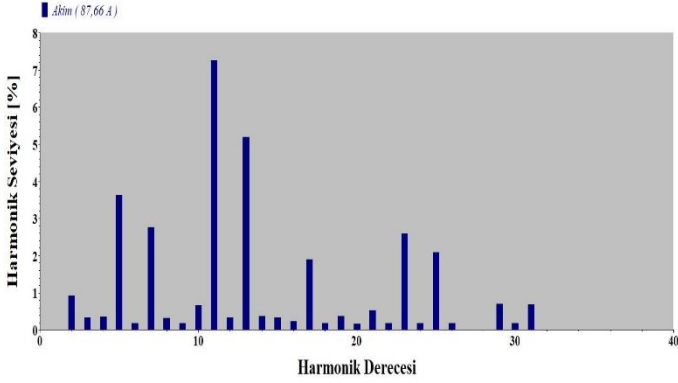
Sistem modellemesi aşamasında, baralar, branslar ve makine verilerin ayrı veri düzenleyicilerinde modellenmesi, kullanıcının ortak veri tabanında çalışmasına olanak sağlar. Harmonik Analizi modülü ile çeşitli güç sistem elemanları ve cihazlarının, harmonik kaynaklarının varlığı durumundaki frekans bağımlılığı, lineer olmama vb. karakteristikleriyle birlikte doğru bir biçimde modellenmektedir.

Ele alınan sistemin ETAP programında oluşturulan tek hat Şeması Şekil 1'de verilmiştir. Bu tek hat şemasına göre, TEİAŞ Atışalanı 380/154/34,5 kV İndirici merkezden alınan enerji raylı sistemin enerjisini sağlamaktadır. Sistemde, iç ihtiyaç yüklerinin beslediği 34,5/0,4 kV gerilimli ve 250 kVA ile 400 kVA güçlerinde yardımcı güç trafoları mevcuttur. Cer yükleri ise 1,5 MVA gücünde üçgen ve yıldız olmak üzere çift sekondere sahip CER trafoları üzerinden doğrultucular vasıtasıyla beslenmektedir. ETAP programı üzerinde CER trafolarının yüzde empedans, X/R oranı gibi değerleri gerçek değerler baz alınarak girilmiştir. Doğrultucular da benzer şekilde gerçekteki gibi 12 darbeleri ve 750 V DC çıkış gerilimine sahip olacak şekilde modellenmiştir.

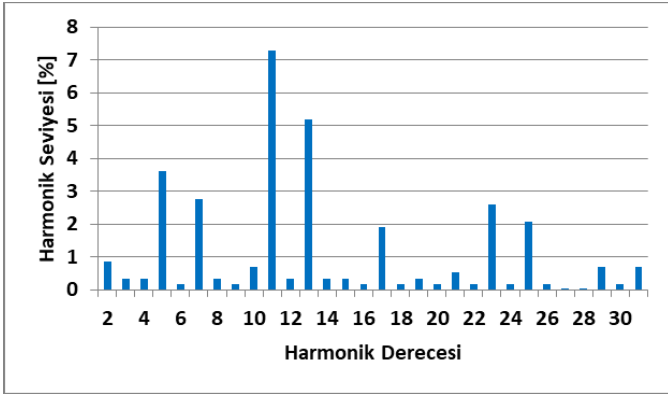


Şekil 1. Çalışmada ele alınan merkezin ETAP programındaki modeli

Model oluşturulduktan sonra, ilk olarak sisteme ait yük akışı analizi yapılarak bara akımları, görünür güçleri, güç faktörü değerleri ile PCC noktasındaki akım harmoniklerinin grafiği elde edilmiştir. Modelin doğruluğunun test edilmesi amacıyla, ETAP üzerinde PCC noktasındaki akım harmoniklerinin grafiği ile aynı noktadan gerçekte elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen harmonik spektrumu Şekil 2’de, gerçek ölçüm sonuçları sonucu elde edilen spektrum ise Şekil 3’te sırasıyla sunulmuştur.



Şekil 2. PCC Noktası ETAP Harmonik Spektrumu



Şekil 3. PCC Noktası Gerçek Ölçüm Sonuçları Spektrumu

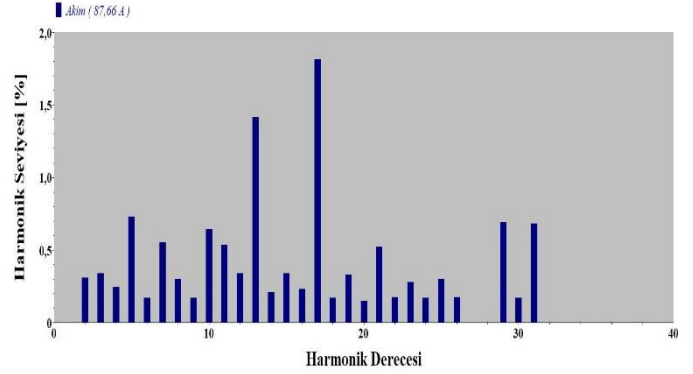
Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde, ETAP üzerindeki modele ait harmonik değerleri ile reel değerlerin birbirini doğruladığı görülmektedir. Dolayısıyla bu grafiklerin karşılaştırılması neticesinde ETAP modelinin gerçek değerlere yakın sonuçlar verdiği ve modelin başarılı bir şekilde çalıştığı söylenebilir. Ayrıca yine bu grafiklerden hareketle, şebekede 5., 7., 11., 13. ve 23. mertebeden harmoniklerin etkisinin daha fazla olduğu sonucuna varılabilir.

Güç kalitesini önemli derecede etkileyen bu harmoniklerin ortadan tamamen kaldırılması veya kısmen süzülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, bu çalışmada iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar, CER trafosunun sekonderine bağlı olan doğrultucuların darbe sayısının değiştirilmesi ile pasif filtrelemedir. Bölüm 3.2 ve 3.3’te sırasıyla bunlardan bahsedilecektir.

3.2 Farklı Darbe Sayılarına Sahip Doğrultucuların Kullanılması

Mevcut sistemde kullanılan 12 darbeleri doğrultucular, 2 adet 6 darbeleri doğrultucunun ortak DC barayı besleyecek şekilde paralellenmesi ile oluşturulur ve aslında raylı sistemlerde sıkça kullanılan bir konfigürasyondur. Modellenen sistemde kullanılan 12 darbeleri VFD doğrultucular, ağırlıklı olarak 11, 13, 23, 25, ...

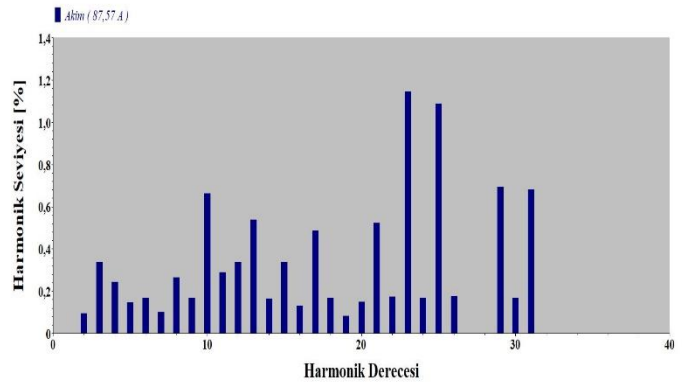
mertebeli harmonikleri içermektedir. Teorik olarak bu değerleri kısmen elimine etme özelliğine sahip olan 18 ve 24 darbeleri doğrultucular, sırasıyla ETAP modeli üzerinde işlenmiş ve sonuçları analiz edilmiştir. PCC noktasının 18 ve 24 darbeleri doğrultucu kullanılması durumunda harmonik spektrumu sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’te sunulmuştur. Sayısal sonuçlar incelendiğinde, 12 darbeleri doğrultucular ile birlikte dağıtım transformatörünün sekonder tarafında ölçülen toplam harmonik bozulumu %10,89 olmasına karşın 18 darbeleri doğrultucu kullanıldığında %3,04 mertebesine inmiştir.



Şekil 4. 18 darbeleri doğrultucu kullanılması durumunda PCC noktası harmonik spektrumu

Tekil harmonik bozulmaları incelendiğinde ise özellikle 12 darbeleri doğrultucular nedeniyle sistemde baskın olan 11. ve 13. harmonik değerleri 18 darbeleri doğrultucular kullanıldığında sırasıyla % 7,26 ile %5,19 değerlerinden %1,67 ile %1,70 değerlerine düşmüştür.

24 darbeleri doğrultucu kullanıldığında ise 23. mertebeden küçük harmonikler büyük bir miktarda etkisini kaybetmiş, 24 darbeleri doğrultucunun doğası gereği 23. ve 25. harmonikler daha baskın şekilde ortaya çıkmıştır. Tekil harmonik bozulmalarına bakıldığında 23. harmoniğin %1,14, 25. harmoniğin ise %1,09 değerlerinde olduğu görülmektedir. Bunun altındaki harmonik mertebelerinin de tekil harmonik değerlerinin %0,5 altında kaldığı söylenebilir. Özellikle yine 18 darbeleri doğrultucu tarafından üretilen 17. harmonik değeri %1,89 dan %0,5, 19. harmonik değeri ise %0,33 ten %0,08 değerine düşmüştür. İndirici trafonun sekonder tarafına bakıldığında THB değerinin bir miktar daha azalarak %2,36 olduğu sonucuna varılmıştır. Genel olarak 24 darbeleri doğrultucu, neredeyse tüm düşük frekanslı harmoniklerin ortadan kaldırılması açısından avantajlı olmasına karşın, özel transformatörler kullanılması ve diğer doğrultuculara göre yüksek maliyetlere sahip olması yönüyle dezavantajlı olabilecek bir çözümdür.



Şekil 5. 24 darbeleri doğrultucu kullanılması durumunda PCC noktası harmonik spektrumu

Ele alınan sistem için harmonikleri azaltmak için önerilen diğer bir yöntem de pasif filtre kullanımınıdır. Bölüm 3.3'te bununla ilgili detaylar sunulmuştur.

3.3 Pasif Filtreleme Yönteminin Kullanılması

Pasif filtreler, güç kaynağı ile yük arasına yerleştirilen ve talep edilen harmonik akımlarını yok etmek için tasarlanan devrelerdir. Bu filtreler akım harmoniklerini azaltmanın yanı sıra reaktif güç kompanzasyonu ve DC bara gerilimi regülasyonu da sağlar. Çalışma mantığı ise ayarlandıkları harmonik frekanslarında yüksek empedans oluşturarak harmonik akımının besleme şebekesine geçişine engel olmaktadır. Kullanım amacına göre farklı türde filtrelerin kullanımı mümkün olup, bu çalışmada endüstriyel olarak kullanımı yaygın olan tek ayarlı pasif filtre tasarımı ile harmoniklerin azaltılması hedeflenmiştir.

Pasif filtreler sistemde kompanzasyon etkisi de göstereceğinden, tasarım aşamasında öncelikle filtrede kullanılacak kapasitans değeri kompanzasyon için gerekli reaktif güce göre belirlenir. Bu nedenle sistemin ilk olarak ETAP üzerinde yük akış analizi yapılmış, filtre kollarının bağlanacağı baradaki güç faktörü değeri ile toplam görünür güç değerleri elde edilmiştir. Baradaki toplam güç değerinin 6148 kVA, güç faktörü değeri ise %84,4 olduğu görülmüştür. Sonraki aşamada Bölüm 3.1'de anlatıldığı üzere yapılan analiz sonucunda PCC noktasında 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerin en baskın harmonikler olduğu görülmüştür. Bu nedenle filtre tasarımında bu harmoniklerin sönümlenmesi esas alınmıştır.

Güç faktörünün %84,4 değerinden %99 değerine çıkarılabilmesi amacıyla gereken reaktif güç ve dolayısı ile filtre gücü Eşitlik 4 ile hesaplanır.

$$Q_f = P_x (\tan (\cos^{-1} p f_0) - (\tan (\cos^{-1} p f_{01}))) \quad (4)$$

Burada Q_f tek ayarlı pasif filtrenin reaktif gücü (kVA), P filtrenin bağlandığı baradaki toplam aktif güç (kW), $p f_0$ filtrenin bağlandığı baradaki güç faktörü, $p f_1$ kompanzasyon uygulandıktan sonraki güç faktörüdür. Birden fazla kollu paralel tek ayarlı filtrelerde, her harmonik mertebesinin genlik değeri farklı olduğundan, her bir paralel kol için kapasite değerini yaklaşık olarak hesaplayabilmek için Eşitlik 5'ten yararlanılır.

$$Q_{fh} = Q_f \times \frac{I_h}{\sum_{n=2}^h I_n} \quad (5)$$

Eşitlik 5'te h süzülecek olan harmoniğin mertebesi, Q_{fh} , h . harmoniği süzecek kolun kapasitesi (kVA), I_h , h . harmoniğin akım genlik değeri (A) olarak tanımlanır. Denklemin paydasındaki değer de tüm harmonik akımlarının toplamı olarak ifade edilmektedir. Bununla birlikte, filtrenin gücünü veren Q_{fh} değeri, içerisinde hem kapasitörün gücü olan Q_c 'yi hem de endüktansın gücü olan Q_L 'i barındırmaktadır. Bu güç değerleri arasında Eşitlik 6-10 ile verilen bağıntılar mevcuttur.

$$Q_c = \frac{h^2}{h^2 - 1} \times Q_f \quad (6)$$

$$Q_L = Q_c - Q_f \quad (7)$$

$$Q_L = \frac{1}{h^2} \times Q_c \quad (8)$$

$$X_C = \frac{U^2}{Q_c} \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_C} \quad (10)$$

Bu eşitliklerde U , sistemin nominal fazlararası gerilim seviyesini ifade etmektedir. Kapasitör reaktansı hesaplandıktan sonra, filtre reaktör faktörü olarak tanımlanan "p" değeri ile filtre reaktörü seçimi yapılır. Filtre reaktörü faktörü de Eşitlik (11)'de verilen bağıntı ile hesaplanabilir.

$$p = \frac{f^2}{f_r^2} \quad (11)$$

Reaktör empedansı da

$$X_L = p \times X_C \quad (12)$$

eşitliği ile verilir. Bütün bunlara bağlı olarak kondansatör gerilimi de,

$$U_C = \frac{U}{1-p} \quad (13)$$

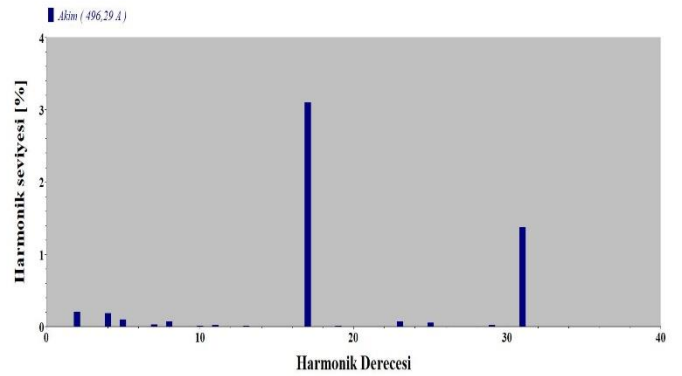
şeklinde hesaplanır.

Eşitlik (4)'ten Eşitlik (13)'e kadar olan bütün bağıntılar kullanılarak sisteme eklenecek olan filtrenin hesabı yapılabilir. Şekil 1'de yer alan tesise ait model için yapılan harmonik analizi sonucunda ve ilgili bağıntılar kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen filtre değerleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 1. PCC Noktasına Bağlanacak Filtreye Ait Değerler

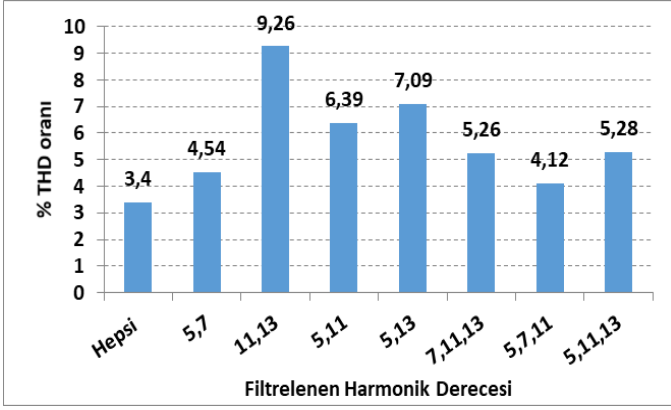
Filtrelenen Harmonik Derecesi	Kapasite [uF]	Reaktör Empedansı [Ω]	Direnç [Ω]
5	20,36	6,5126	0,163
7	20,36	3,2844	0,082
11	20,36	1,3161	0,033
13	20,36	0,9397	0,023

Filtreler modellendikten sonra modellenen filtreler PCC barasına bağlanmış ve sistemin harmonik analizi yapılmıştır. Filtreleme sonrası bağlantı noktasındaki harmonik spektrumu Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Filtreleme Sonrası PCC noktası harmonik spektrumu

Şekil 6'daki grafikten de görüldüğü üzere sistemde bulunan 17. ve 31. harmonik bileşenleri hariç diğer harmonikler büyük ölçüde filtrelenmiştir. Bu değerler de standardın belirlemiş olduğu limitlerin altında kaldığı için sorun teşkil etmemektedir. Sistemde farklı derecedeki harmoniklerin filtrelenmesi durumunda THB değerlerinin nasıl değiştiği de Şekil 7'de verilen grafikte anlatılmaya çalışılmıştır. Bu grafikte de görüldüğü üzere tüm baskın harmonik dereceleri sönümlendiği takdirde THB değeri daha düşük seviyeye inmektedir.



Şekil 7. Farklı filtreleme durumları için ortaya çıkan THB değerleri

Diğer taraftan grafikteki değerler baz alındığında, tüm filtre kollarının sisteme eklenmesinin yanı sıra yalnız 5. ve 7. harmonikler için tek ayarlı pasif filtre kolunun eklenmesi de THB değerini yaklaşık olarak %63,5 kadar azaltmıştır. Bu durum, maliyetin de göz önünde bulundurulması gerektiği noktalarda optimum bir çözüm olarak değerlendirilebilir.

4. Bulgular ve Tartışma

Enerjinin kalitesini büyük ölçüde etkileyen ve özellikle raylı sistemler gibi yüklerin artması sonucu üzerinde durulması gereken konulardan biri harmoniklerdir. İşletmede olan sistemlerin harmoniklerinin tespit edilmesi için belirli noktalar ve belirli zaman aralıklarında analizör ile ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Çalışmada örnek alınan ve modellenen Metro İstanbul'a ait merkezden benzer şekilde ölçümler alınmış ve değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda sistem modellenip, önce doğrultucuların darbe sayılarının değiştirilmesi ve ardından pasif filtreleme yöntemleri ile harmonik bileşenler bastırılmaya çalışılmıştır.

Doğrultucunun darbe sayısının artırılmasının, raylı sistemlerde harmonik problemlerini önemli derecede azalttığı yapılan analizler sonucunda gözlemlenmiştir. Alınan ölçümlerde de görüldüğü gibi baskın olan 11. ve 13. gibi harmonikler 12 darbeleri doğrultucular tarafından enjekte edilen bileşenler olmakla beraber, 18 ve 24 darbeleri doğrultucuların kullanımı bu sorunu ortadan kaldırmıştır. TEİAŞ sekonderinde ölçüden THB değeri %10,89 iken, 18 darbeleri doğrultucu kullanıldığında bu değer %3,09, 24 darbeleri için ise %2,36 değerine inmiştir. Yükün değişken olmadığı durumlarda pasif filtrelerin kullanımı da harmoniklerin eliminasyonu açısından iyi sonuç alınabilecek bir yöntemdir. Yapılan çalışmada 4 farklı harmonik bileşeni için ayrı kollar tasarlandığından, bu sorun şebekenin orta gerilimli kısmında giderilmeye çalışılmıştır. ETAP üzerinde hesaplanan değerler doğrultusunda filtre kullanımı ile THB değerinin %3,40 değerine düştüğü ve yalnız yüksek mertebeli harmonik bileşenlerinden baskın olanların etkinliklerini devam ettirdikleri gözlemlenmiştir.

Bir raylı sistem hattının tamamı için bu çalışma genişletilecek olursa filtre çeşidinin seçimi aşamasında raylı sistem araçlarının statik yükler olduğu göz önünde bulundurulmalı ve yük profilleri incelenmeli, gerekirse uygun bir hibrit filtre veya aktif filtre topolojisi seçilmelidir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan raylı sistem merkezinin modellenmesinde ve bu merkezden ölçülmüş harmonik akım

spektrumlarının kullanılmasında desteklerini esirgemeyen Metro İstanbul A.Ş.'ye teşekkür eder.

Kaynaklar

- Antonopoulos, A. ve Svensson, J. R., 2016. Evaluation of Negative-Sequence-Current Compensators for High-Speed Electric Railways, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 18-22 September 2016, Milwaukee, USA.
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği, 2017.
- Fathima, F. ve Karthikeyan S.P., 2016. Harmonic analysis on various traction transformers in co-phase traction system, Ain Shams Engineering Journal, pp. 627-638.
- Hu, S., Zhang, Z., Chen, Y., Zhou, G., Li, Y., Luo, L., Cao, Y., Xie, B., Chen, X., Wu, B. ve Rehtanz, C., 2015. A New Integrated Hybrid Power Quality Control System for Electrical Railway, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 62, Issue.10, pp. 6222-6232.
- IEEE, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
- Jafarikaleybar, H., Kazemzadeh, R. ve Farshad, S., 2015. Power Rating Reduction of Railway Power Quality Compensator Using Steinmetz Theory, The 6th International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 3-4 Feb 2015, Tehran, Iran, pp. 442-447.
- Lao, K., Wong, M., Dai, N., Wong, C. ve Lam, C., 2015, A Systematic Approach to Hybrid Railway Power Conditioner Design With Harmonic Compensation for High-Speed Railway, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 62, Issue.2, pp. 930-942.
- Pang, Y. Ve Xu, Y., 2016. Analysis and Treatment of Harmonic in Power Network with Railway based on ETAP Software, IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference, 25-28 Oct. 2016, Xi'an, China, pp. 1424-1429.
- Roudsari, H. M., Jalilian, A. ve Jamali, S., 2016. A Z-Source Railway Static Power Conditioner for Power Quality Improvement", 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 16-18 Feb. 2016, pp. 261-267.
- Song, S., Liu, J., Ouyang, S. ve Chen, X., 2016. A Modular Multilevel Converter Based Railway Power Conditioner for Power Balance and Harmonic Compensation in Scott Railway Traction System, IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 22-26 May 2016, Hefei, China.
- Yousefi, S., Biyouki, M. M. H., Zaboli, A., Abyaneh, H. A. ve Hosseinian S. H., 2017. Harmonic Elimination of 25 kV AC Electric Railways Utilizing a New Hybrid Filter Structure, AUT Journal of Electrical Engineering, Vol. 49, Issue.1, pp. 3-10.
- Zhang, D., Zhang, Z., Wang, W. ve Yang, Y., 2016. Negative Sequence Current Optimizing Control Based on Railway Static Power Conditioner in V/v Traction Power Supply System, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, Issue.1, pp. 200-212.

Wang, H., Li, Y., Liu, H., Wu, L. ve Sun, Y., 2016. Transmission Characteristics of Harmonics and Negative Sequence Components of Electrified Railway in Power System, International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies, 19-22 Oct. 2016, Chengdu, China, pp. 301-306.