

TİRİSTÖR KONTROLLU REAKTÖR TASARIMINDA AKIM HARMONİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

H. Bilge MUTLUER

TÜBİTAK-Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, ODTÜ 06531 ANKARA

bilge.mutluer@uzay.tubitak.gov.tr

Öz: TKR (Tiristör Kontrollü Reaktör) tipi SVK'larda (Statik VAR Kompanzatorleri) tetikleme açısına göre genliği değişen akım harmonikleri oluşmaktadır. Geçici düzende çalışan TKR'lerde normalde oluşan tek harmoniklere ek olarak, çift harmonikler de görülmektedir. Tasarım aşamasında tesisin bağlanacağı barada TKR'nin çalışma karakteristiği göz önüne alınarak detaylı bir tasarım yapılmalıdır. Filtre tasarımı yaparken, hem yükün hem de TKR'nin çalışma prensipleri göz önüne alınmalıdır.

Anahtar Kelimeler: TKR, tiristör kontrollü reaktör, statik VAR kompanzasyonu, kompanzasyon

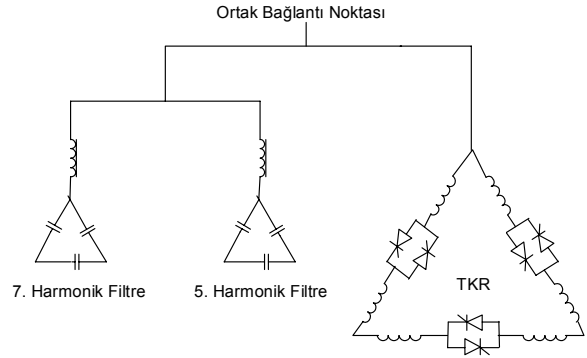
I. GİRİŞ

Reaktif güç değişimi hızlı olan yüklerin kompanzasyonunda statik tabanlı reaktif güç kompanzasyonu topolojileri tercih edilmektedir. Bunun sebebi, konvansiyonel mekanik tabanlı sistemlerin tepki süresinin saniyeler ve dakikalar seviyesinde olmasıdır. Pota ocakları, ark ocakları, elektrik ekskavatörleri ve CNC tezgahları gibi reaktif gücü çok hızlı değişen sistemlerin kompanzasyonu için milisaniyeler seviyesinde tepki verebilen sistemler gereklidir. Literatürde TKR (Tiristör Kontrollü Reaktör), TAR (Tiristör Anahtarlama Reaktör), TAK (Tiristör Anahtarlama Kondansatör), STATKOM (Statik Senkron Kompanzator) gibi Statik VAR Kompanzatorleri (SVK) yaygın olarak kullanılmaktadır [4-7].

Türkiye'de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının Şubat 2000'de reaktif gücün aktif güce oranlarını endüktif için %33'e, kapasitif için ise %20'ye indirmesinden sonra kompanzasyona olan ihtiyaç artmıştır. EPDK tarafından yayınlanan "Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği" uyarınca söz konusu oranlar 1 Ocak 2007 tarihinden itibaren kademeli olarak daha da düşürülecektir. Reaktif enerjinin aktif enerjiye oranının düşürülmesi kompanzasyon sistemlerindeki tepki süresinin daha ön plana çıkmasına sebep olmaktadır.

TKR tipi sistemler, tiristörlerin yüksek güçlerde ucuz ve kolay bir anahtarlama elemanı olarak kullanılabilirliği sayesinde özellikle son çeyrek yüzyıldır çok çeşitli endüstriyel tesislerin, elektrik

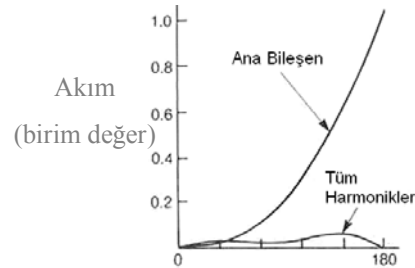
iletim ve dağıtım hatlarının kompanzasyonunda kullanılmaktadır. Tipik bir TKR sistemi Şekil 1'de görülmektedir. TKR'lerin anahtarlama açılarının değiştirilmesi ile reaktörlerden geçen akım değiştirilmekte ve reaktif güç kompanzasyonu sağlanmaktadır. Ayrıca, sistemin suseptansı da anahtarlama açısı ile değişmekte, dolayısı ile dengesiz yüklerin dengelenmesi de belirli bir düzeye kadar sağlanabilmektedir. Bu yüzden darbeli yükler çeken ark ve pota ocaklarında TKR tipi SVK'lar tercih edilmiştir.



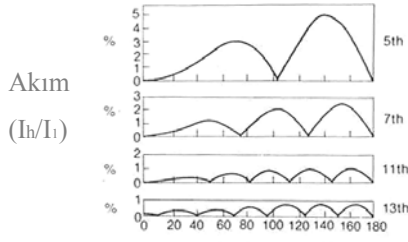
Şekil 1. TKR sisteminin tek hat şeması

II. TKR'DEKİ HARMONİK AKIMLAR

Tiristörlerin iletim açılarına bağlı olarak akım Şekil 2'deki gibi değişmektedir. Bu akımın Fourier analizi yapıldığında TKR içerisinde 3,5,7,11,13 ve daha yüksek harmoniklerin üretildiği görülmektedir. Üçgen bağlanan bir TKR için üçüncü harmonik ve üçüncü harmoniğin katları hat akımına geçmemekte ve üçgen içinde dolaşmaktadır. Harmoniklerin tetikleme açısına göre Miller tarafından [1] Şekil 3'deki gibi çıkarılmıştır.



Şekil 2. İletim açısına göre TKR akımları



Şekil 3. İletim açısına göre TKR Akım Harmonikler

Tetikleme açısına karşılık harmonik içeriği aşağıdaki gibidir [1]:

$$I_n = \frac{4}{\pi} \frac{V}{X_L} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right]$$

n=3,5,7,...

I_n her bir harmonik için anlık harmonik akımının rms değeridir. X_L reaktörlerin 50 Hz'teki reaktansıdır. Bir TKR 90°-180° arasında değişen tetikleme açıları ile kararlı olarak tetiklenebilir. 90° öncesindeki tetiklemelerde doğru akım bileşeni olacağı için bir sonraki tiristör tetiklemesi gerçekleşmeyebilir, ayrıca DA bileşeni AA güç devrelerinde kaçınılması gereken bir bileşendir.

Baskın olan harmonikler, özellikle 5. ve 7. harmonikler için bir filtre tasarlanması güç kalitesi için gerekmektedir. Filtresiz tasarlanan bir SVK sistemi, sisteme bastığı akım harmonikleri ile aynı baraya bağlı rezonans frekansı bu harmoniklere yakın elektriksel yüklerde bozunuma sebep olacaktır. Güçlü olmayan, kaynak empedansı yüksek bir fiderle beslenen sistemlerde ise akım harmonikleri gerilimi de bozacaktır.

Geçici düzende çalışan bir TKR için ters paralel tiristörlerin tetikleme açıları her çevrimde değiştiği için çift harmonikler de çıkmaktadır. Çift harmoniklerin genliği pozitif ve negatif çevrimlerde tetikleme açısı değişimi ile doğru orantılıdır. DA ve AA motor yükü baskın olan baralarda çift harmonikler düşük seyredirken, pota ocağı ve ark ocağı yüklerde ise çift harmonikler IEC ve IEEE standartlarının çok üstünde seyretmektedir. Eğer SVK'nın bağlı olduğu barada çift harmonikleri süzen bir filtre yoksa çift harmonikler bağlı bulunan baraya ve harmonik frekansındaki empedansı düşük olan tüm diğer yüklere gidecektir.

Akım harmoniklerinin sisteme etkileri araştırılırken bağlanılan ortak bağlantı noktasındaki paralel rezonans frekansları hesaplanmalı, hesaplanamıyorsa simülasyon yolu ile tespit edilmelidir. Harmonik akım genliğinin standartların üzerine çıkmasına engel olmak için SVK için filtre tasarımı yapılması gerekmektedir. Filtrelerin tüm harmonik akımı süzemeyeceği göz önüne alınarak harmoniklerden etkilenmesi muhtemel yüklerde gerekli önlemler alınmalıdır.

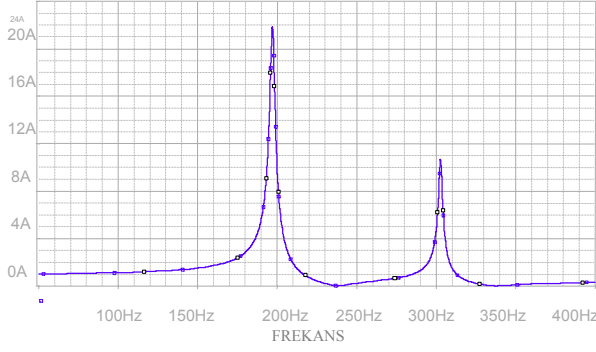
III. SVK İÇİN FİLTRE TASARIMI

Filtre tasarımlarında reaktif güç kompanzasyonu için gerekli olan kapasitif reaktif güç tespit edildikten sonra şönt kapasitif filtre tasarımı için Tablo I'deki değerler göz önüne alınmalıdır. Tablo'daki değerler bağlı bulunan baranın kısa devre akımının nominal akımına oranından bulunan değer kullanılarak harmoniklerin RMS genlik limitleri bulunmaktadır. Tabloda yurdumuzda bu değerlerin daha sık rastlanması açısından 154kV tarafı için 100-1000 arası, 34.5kV tarafı için 20-50 arası örnek olarak verilmiştir.

TABLO I

Harmonik no.	IEEE Std.519 ve Türk harmonik standartlarındaki limit değerler	
	154 kV tarafı (%) (100<1000)	34.5 kV tarafı (%) (20<50)
2	1.50	1.75
3	6.00	7.00
4	1.50	1.75
5	6.00	7.00
6	1.50	1.75
7	6.00	7.00
8	1.50	1.75
9	6.00	7.00
10	0.69	0.88
11	2.75	3.50
12	0.69	0.88
13	2.75	3.50
TDD	7.5	8.0

IEC 61000-4-30, Türk Harmonik Standartları ve IEEE Std.519-1992. [9] standardında harmoniklerin 15 dakikalık ölçüm sonucu elde edilen verilerde maksimum 3 saniyelik ortalamalar alınarak elde edilmiş harmonik değerlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Yük akımının ilgili standartlara göre değerlendirilmesi sonucu çıkacak olan harmonik akım değerleri SVK tarafından üretilecek olan harmonik akım değerleri ile toplanmalıdır. Standartta belirtilen değerleri geçen harmonikler için filtre tasarımı düşünülmelidir. Şekil 4.'te örnek bir filtre karakteristiği görülmektedir. Filtre tasarımında dikkat edilmesi gereken, filtreler belli frekansları süzerken belli frekansları da yükseltmektedir. Filtre değerleri tespit edildikten sonra ortak bağlantı noktasındaki seri ve paralel rezonans frekansları göz önüne alınarak [8] simülasyon ya da hesaplama yoluyla yükseltme ya da rezonans riski olup olmadığı değerlendirilmelidir.



Şekil 4. Bilgisayar simülasyonu ile 1A harmonik akım kaynağı kullanarak elde edilmiş paralel bağlı 5nci ve 7nci Filtre frekans karakteristiği

Reaktör tasarımında harmoniklerden kaynaklanan ek ısınmalar göz önüne alınmalıdır. Kondansatörler üzerindeki gerilimin normalden daha çok yükselmesi de yine harmonikler nedeni ile olmaktadır.

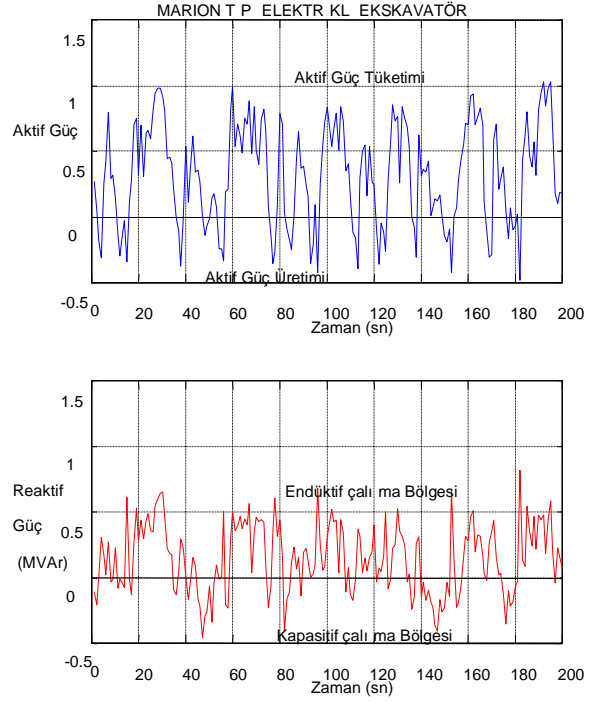
Eğer yükü filtrelemek için harmonik filtreler mevcut ise, SVK'nın harmonik akımları dikkate alınarak bir tasarım yapılabilir. TKR tipi SVK'da en baskın harmonikler 5 ve 7nci harmonikler olduğu için genellikle bunları yok etmek amacıyla filtre tasarımı yapılır. Çift sekonderli trafo kullanılarak 12 darbeli yıldız üçgen çıkışlar sayesinde de bu harmonikler yok edilebilir.

TKR'deki çift harmonikler tepki süresi, tetikleme ya da ölçme devrelerindeki gecikme ya da hatalar, ölçme devrelerindeki doğrusal olmayan sinyal çıkışları, ters paralel tiristörlerden birinin tetiklenememesi gibi sebeplerden meydana gelebilir. Doğrusal ve ideal tasarlanmış bir sistem için çift harmonikleri azaltmanın yolu tepki süresini değiştirmek olabilir. Bunun için eğer orantısal ve tümlevsel bir kontrol uygulanıyorsa zaman sabitinin değiştirilmesi gerekebilir. Tepki süresinin yanlış seçilmesi salınımlara ve hatta kararsızlığa neden olabilir. Ayrıca tepki süresinin çok azaltılması kompanzasyonun yapılamamasına ve yükün dengelenememesine neden olacaktır [1].

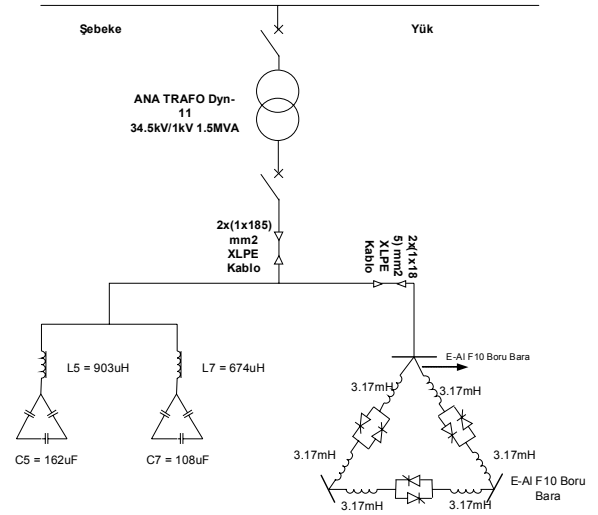
IV. MOTOR SÜRÜCÜSÜ TİPİ YÜKLER İÇİN TKR TASARIMI UYGULAMASI

Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğüne (TKİ) bağlı müesseselerde çeşitli boyut ve güçte elektrikli ekskavatörler bulunmaktadır. Bu ekskavatörler, Şekil 5'te de görüldüğü gibi hem çok değişken reaktif güçler çekmektedir. Bu gibi bir yükün tepki süresi yavaş kompanzasyon tipleri ile kompanze edilemeyeceği açıktır.

Reaktif gücün sık sık endüktif ile kapasitif arasında değişmesi de kompanzasyonu zorlaştırmaktadır.

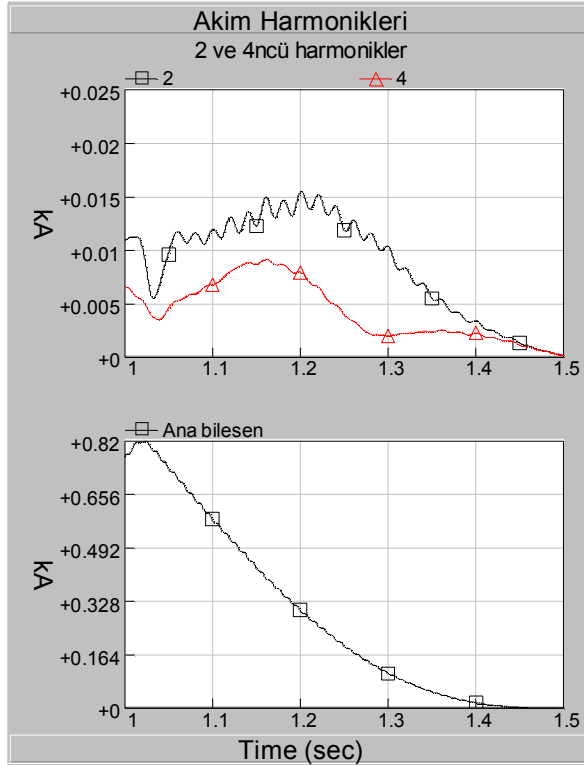


Şekil 5. Girişi tiristörlü çevirgeç içeren bir elektrikli ekskavatörün şebekeden çektiği aktif ve reaktif güç

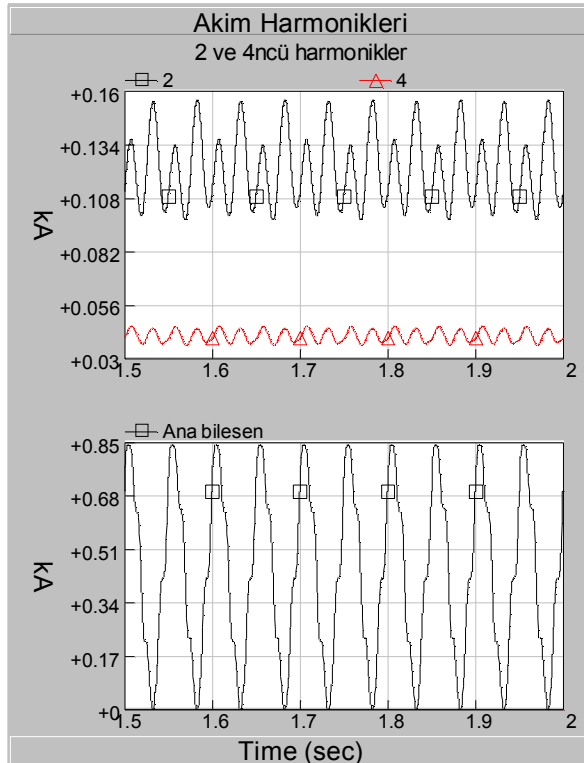


Şekil 6. TKİ için tasarlanan sistemlerin tek hat şeması

TKR tasarımında dikkat edilmesi gereken bir diğer konu da trafo tasarımıdır. Geçici düzen çalışırken ortaya çıkan doğru akım ve diğer harmonik bileşenler bir süre sonra trafonun nüvesinde doyuma sebep olabilir. Bu yüzden en kötü koşullarda ortaya çıkacak harmonikler göz önüne alınarak tasarım yapılmalıdır. TKİ için tasarlanan sistemlerde, normalde 1,8T olarak tasarlanan manyetik akı 1,6T olarak değiştirilerek trafonun doyuma ulaşma ihtimali düşürülmüştür.



Şekil 7. Yavaş değişen akımlar için 1,5MVA TKR'nin 2nci ve 4ncü harmonik akımları



Şekil 8. Hızlı değişen akımlar için 1,5MVA TKR'nin 2nci ve 4ncü harmonik akımları

Yukarıda, Şekil 7 ve Şekil 8'de de görüldüğü gibi akımın artış/azalma hızı arttıkça çift harmonikler de çok artmaktadır. Yük akımının çeşitlilik gösterdiği yerlerde çift harmonikler bazen yük akımı ile birleşip

artmakta, bazen de yük akımındaki harmoniklerle birbirini yok etmektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere tasarlanan sistemlerde 190Hz yakınlarında akımlar 22 kat yükseltmeye uğramaktadır. 200 Hz (4ncü harmonik) akımları da filtrelerde 8 kata kadar yükselmeye uğramaktadır. Dolayısı ile kondansatör ve kompanzasyon trafosu seçimlerinde bu kriter de 5nci ve 7nci harmonik ile birlikte göz önüne alınmıştır [2].

V. POTA OCAĞI TİPİ YÜK İÇİN TKR TASARIMI UYGULAMASI

Tablo II'de İSDEMİR pota ocağı trafosunun girişinde yapılan ölçümlere göre yük akımı için beklenen ortalama ve maksimum harmonik akım değerleri verilmiştir.

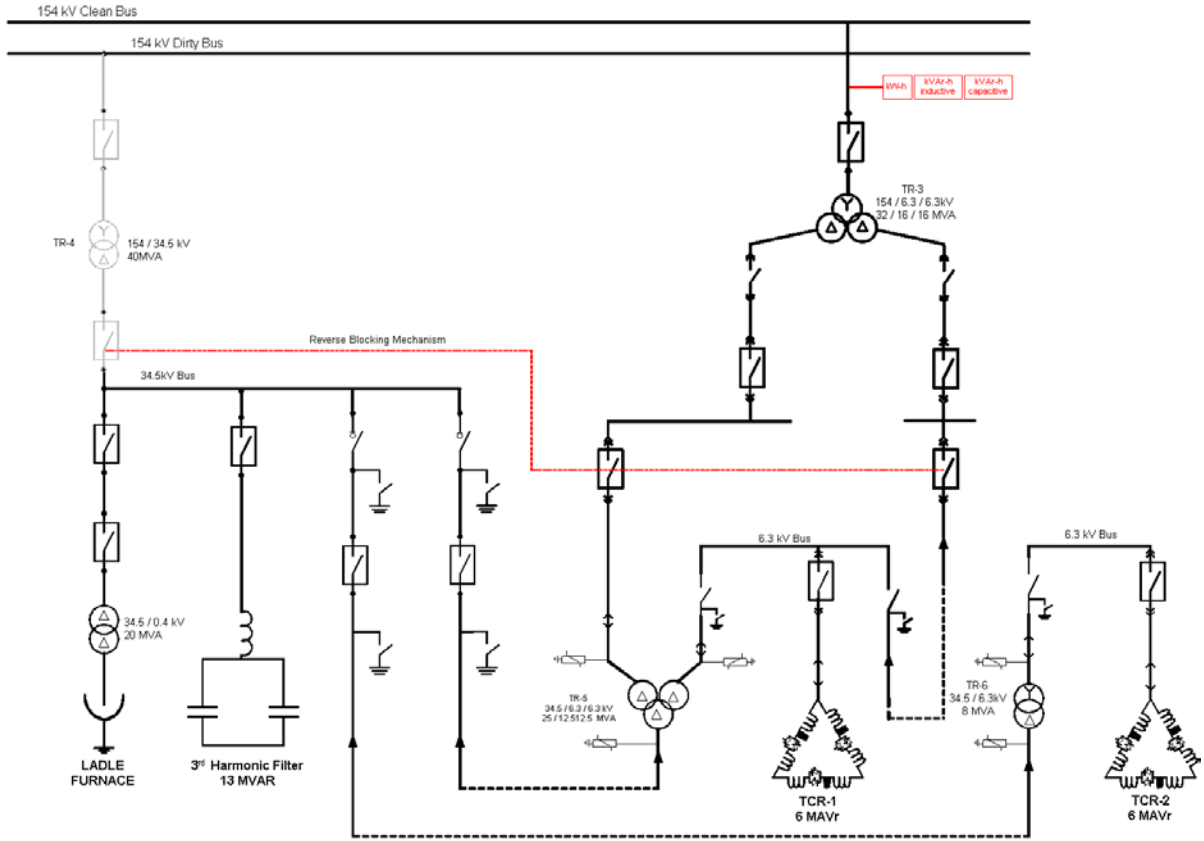
TABLO II

Harmonik no.	Pota Ocağı, %		Pota Ocağı ve 3 ^{ncü} Harmonik Filtre, %	
	Ortalama	Maksimum	Ortalama	Maximum
2	2.0	6.0	3.0	8.0
3	5.5	8.5	3.5	7.0
4	1.5	3.5	1.0	3.0
5	2.5	4.5	2.0	3.5
6	0.8	2.5	0.5	1.5
7	1.4	1.8	1.0	1.5
8	0.6	1.2	0.5	1.0
9	0.7	1.0	0.5	0.8
10	0.5	0.8	0.4	0.8
11	0.5	0.8	0.3	0.8
12	0.4	0.6	0.2	0.6
13	0.5	0.7	0.3	0.7
TDD*	7.0	10.0	6.0	10.0

Tablo I'deki değerlerle karşılaştırıldığında 2,3 ve 4. harmoniklerin standartta belirtilen değerleri aştığı görülmektedir. Sistemde kurulu olan 3. harmonik filtresi devreye girdiğinde 3ncü ve 4ncü harmonik değerler azalmaktadır.

5nci ve 7nci harmoniklerin SVK tarafından artırılmaması için Şekil 9'daki çözüm düşünülmüştür. TKR'lerin bir tanesi üçgen-üçgen, diğeri üçgen-yıldız trafo üzerinden bağlanmıştır. Böylelikle, 12 darbeli tetikleme yapılarak 5nci ve 7nci harmonikler ortak bağlantı noktasında yok edilmiştir. Ayrıca sistemin çift taraftan farklı trafolar ile beslenebilmesi sağlanarak yedekli ve indirgenebilir bir çözüm sağlanmıştır. Mevcut 3ncü filtre korunmuş, böylelikle de proje maliyeti azaltılmıştır [3].

Çift harmonikler 3ncü harmonik filtresi tarafından bir miktar süzülmeyle birlikte hala yüksektir. Fakat 154 kV tarafında standartlarda belirtilen limitler aşılmadığından ve kirli baraya bağlı başka yükler olmadığından ek bir filtre tasarımı yapılmamıştır.



Şekil 9. İSDEMİR Pota Ocağı Kompanzasyonu

VI. SONUÇ

TKR tipi SVK tasarımından önce ortak bağlantı noktasındaki akım harmonikleri ölçülüp ilgili standartlardaki limit değerleri ile karşılaştırılmalıdır. TKR'nin hem geçici düzen hem de olağan durumdaki akım harmonikleri dikkate alınarak harmoniklerin hepsi hesaplanmalıdır. Harmoniklerin standarttaki limitlerin altına düşürülmesi için gerekli çalışmalar yapılmalıdır. Ayrıca bağlantı noktasındaki seri ve paralel rezonans karakteristikleri dikkate alınarak limit altındaki harmoniklerin de yükseltilmesi önlenmelidir.

VII. KAYNAKÇA

[1] T.J.E. Miller, "Reactive Power Control In Electric Systems," *John Wiley&Sons*, 1982

[2] Mutluer B, Ermis M et.al, A Unified and Relocatable SVC for Open Cast Lignite Mining in Turkey, *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol 40. pp. 650-663

[3] Design and Implementation of a 12-Pulse TCR for a Ladle Furnace in ISDEMİR Iron & Steel Works", *ACEMP 2004*

[4] L. Gyugyi et al., "Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators," *IEEE Trans. Power Apparatus System*, vol. 97, no. 5, pp. 1935-1945, 1978.

[5] A.E. Hammad, and R.M. Mathur, "A New Generalized Concept for the Design of Thyristor Phase-Controlled Var Compensators. Part I: Steady State Performance," *IEEE Trans. Power Apparatus System*, vol. 98, no. 1, pp. 219-226, 1979.

[6] C. Schauder, E. Stacey, M. Lund, L. Gyugyi, L. Kovalsky, A. Keri, A. Mehreban, and A. Edris, "AEP UPFC Project: Installation, Commissioning and Operation Of The ± 160 MVA STATCOM (PHASE I)," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1530-1535, Oct. 1998.

[7] P. S. Sensarma, K.R. Padiyar and V. Ramanarayanan, "Analysis and Performance Evolution of a Distribution STATCOM for Compensating Voltage Fluctuations," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 259-264, Apr. 2001.

[8] IEC 61642, 'Industrial a.c. networks affected by harmonics – Application of filters and shunt capacitors', 1997.

[9] IEEE Std. 519-1992, 'IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems'.