

## ETİ Alüminyum Tesislerindeki 12-Darbeli Elektroliz Doğrultucuları İçin Güç Kalitesi Çözümleri

B.Gültekin<sup>o</sup>, A.Terciyanlı<sup>†o</sup>, A.Açık<sup>o</sup>, M.Ermis<sup>†o</sup>, I.Çadirci<sup>†o</sup>, N.Özay<sup>†</sup>, M.Gökmen\*

<sup>o</sup> TÜBİTAK-ODTÜ-BİLTEN, ODTÜ Kampüsü, 06531, Ankara

<sup>†</sup> Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, ODTÜ, 06531, Ankara

\*ETİ Alüminyum A.Ş., Seydişehir-Konya

**Özet-**Bu makalede ETİ Alüminyum A.Ş.Seydişehir fabrikasında kullanılan elektroliz amaçlı 12-darbeli DA doğrultuculardan kaynaklanan güç kalitesi problemlerinin çözümleri anlatılmaktadır. Tasarım çalışması, EMTDC/PSCAD, SPICE ve MATLAB programlarıyla yapılan simülasyonların yanında sahada kaydedilen gerçek zamanlı verilere dayanmaktadır. Çalışmanın temel hedefi güncel yönetmeliklere ve harmonik standartlarına uygun, sağlam, güvenilir, ekonomik ve uzun ömürlü sistemlerin tasarımı ve uygulanmasıdır. Şönt bağlı pasif reaktif güç kompanzasyon sistemleri, bir adet sönümlü 11. harmoniğe akord edilmiş filtre ile sönümlendirme direnç kullanımı opsiyonel olan 5. harmonik filtreden oluşmaktadır. Sönümlü dirençlere sahip bu sistemler, neredeyse geçici rejim bileşensiz anahtarlama ve seri rezonans risksiz çalışma özelliklerine sahiptirler. Uygulama sonunda saha verileriyle teorik sonuçlar arasında yakın korelasyon gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** - Metal Endüstrisi, Güç Kalitesi, Reaktif Güç Kompanzasyonu, Harmonik Analizi

### I. GİRİŞ

Alüminyum endüstrisi, ürünlerinin, uzay uygulamalarından tıbbi uygulamalara kadar geniş bir alanda kullanılmasından dolayı dünya ölçeğinde ekonomik olarak önemli bir yere sahiptir. Eriyik haldeki alüminyum, alümina bileşiğinin elektroliz potansiyelinde işlenmesiyle elde edilir. Bu işlem için çok darbeli (12, 24, 48 gibi) yüksek güçlü doğrultucular kullanılmaktadır [1]. Günümüzde dünya üzerinde 200'e yakın üretici fabrika bulunmaktadır [2]. Bu fabrikalardan birisi de ETİ Alüminyum A.Ş.'dir. 1973 yılında Konya Seydişehirde kurulan fabrika Akseki bölgesinde bulunan Boksit madeninden alüminyum ve alüminyum ürünlerini üretmektedir. Fabrika yıllık 200.000 ton alüminyum üretim kapasitesine sahiptir. Fabrikada alüminyum üretiminde en önemli maliyet, diğer ülkeler ile karşılaştırıldığında pahalı olan elektrik enerjisi maliyetidir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Şubat/Mart 2000'de ülkemizdeki elektrik iletimi ve dağıtımında kayıpları azaltmak ve böylece güç santrallerinin kapasitesinin daha verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla güç faktörü sınırları ile ilgili yeni düzenlemeler getirmiştir. Bu düzenlemelere göre, aylık enerji tüketimleri bazında, endüktif reaktif ve kapasitif reaktif enerji tüketimleri sırasıyla aktif

enerji tüketiminin 1/3 ve 1/5'inden az olmalıdır. Bu durumda, güç faktörünün aylık bazda 0.95 end. – 0.98 kap. aralığında olması gerekmektedir. Sistemin genel olarak aşırı kompanzasyonunu önlemek amacıyla, ceza sınırlarının aşılması durumunda kapasitif reaktif enerji cezası, aktif enerji tüketiminin % 90'ı kadar olmaktadır. Bu amaçla bütün kamu ve özel kuruluşların yönetmeliklerin yürürlüğe girmesini takiben 18 ay içerisinde yeni değerlere göre kendi tesislerini düzenlemeleri istenmiştir.

ETİ Alüminyum A.Ş. güç faktörü 0.90 end. etrafında olduğu için, yeni yönetmelikler uyarınca aylık olarak 1.25 Milyon USD/ay reaktif güç cezası ödeme tehlikesiyle karşı karşıya kalmıştır. Bu amaçla yeni güç faktörlerini sağlayan, uygulamaya yönelik bir güç kalitesi projesi Ağustos 2000'de başlatılmıştır. Projenin temel amaçları;

- Güç faktörünü aylık bazda 0.98 endüktif üzerine getirmek,
- Doğrultucuların kullanımından kaynaklanan yüksek genlikli harmonikleri süzerek standartlarda belirtilen değerlerin altına indirmektir [3,4].

Proje ön tasarım çalışmaları yaklaşık dört ay sürmüş ve sistemler sekiz ay içinde realize edilerek Ağustos 2001'de devreye alınmışlardır. Bu makale ETİ Alüminyum A.Ş. için tasarlanıp uygulanan iki adet 10.5 kV, 7.5 MVAR anma gücünde reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme sistemlerinin genel özelliklerini anlatmaktadır.

### II. FABRİKA ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİ

Fabrika TEİAŞ'a bağlı 380 kV iletim sistemi üzerinden 3 adet 125 MVA 380/10.5 kV güç transformatörleriyle beslenmektedir (Şekil.1). Fabrika dağıtım sisteminde 3 ana bara bulunmakta, elektroliz ünitelerini besleyen doğrultucular normal şartlar altında bara-1 ve bara-2 üzerinden beslenmektedir. Bu baraların her birinde altı adet 17.8 MVA doğrultucu transformatörleri bulunmaktadır. Bu transformatörlerin sekonderleri Y-Δ bağlı olup her birinden 6-darbeli doğrultucular beslenmektedir. Böylece normal şartlar altında operasyon 12-darbeli olarak gerçekleşmektedir.

Fabrikadaki mekanik ve elektrik ekipmanlar 1970'li yılların sağlam Sovyet teknolojisi ürünüdür. Tasarım mantığı temel olarak yedekleme ve güvenilirlik üzerine kurulmuştur. Kuruluş tarihinden günümüze kadar bakım-onarım programları periyodik olarak uygulandığından dağıtım ve işletmede çok büyük problemlerle karşılaşılma-

mıştır. Elektroliz üniteleri dışında kalan diğer yükler (haddehane, dökümhane, sosyal tesisler..vb) servis/yedek barası üzerinden beslenmektedir. Projenin ön tasarım aşamasında fabrika yetkililerinden güç kalitesi ile ilgili aşağıdaki problemler bildirilmiştir:

- İşletme, normal şartlarda her 125 MVA'lık ana güç transformatörlerinin ana baralardan birisini beslemesi üzerine kurulmuştur. Ancak, bazen bakım programlarından dolayı 125 MVA'lık trafo bara-1 veya bara-2 ile servis barasını aynı anda besleyebilmektedir. Bu durumda ilgili güç transformatörü üzerinden doğrultuculardan kaynaklanan harmonik akımlar özellikle yaz aylarında termal açmalara neden olmaktadır.
- Harmoniklerden dolayı yüksek güçlü motorlarda aşırı ısınma gözlenmektedir.
- Çamaşır makinası, buzdolabı gibi ev aletlerinde kullanılan elektrik motorları harmoniklerden kaynaklanan kalıcı hasarlara maruz kalmaktadır.

### III. SİSTEM TASARIMI

Her baranın ayrı ayrı elektrik enerjisi tüketimi 125 MVA'lık trafoların 10.5 kV tarafına takılan birer adet aktif ve reaktif enerji sayaçları ile ölçülmektedir. Fabrikanın faturalandırılması ise 3 adet ana barada okunan aktif ve reaktif tüketimlerin toplanması ile yapılmaktadır. Her baranın faturalandırılmasının ayrı yapılma olasılığı göz önüne alınarak baralar için güç faktörü değerinin birbirinden bağımsız olarak 0.98 gibi güvenli bir değere yükseltilmesi yaklaşımı benimsenmiştir. Bu amaçla Şekil.1'de gösterildiği üzere, bara-1 ve bara-2 için neredeyse eşit güçte şönt bağlı filtre grupları tasarlanmıştır. Bunun yanında, servis baraya bağlı büyük senkron motorlar aşırı uyarımda çalıştırılarak, baranın güç faktörü istenilen değerlere çıkartılabilmektedir. Şönt bağlı her bir kompanzasyon sisteminin tasarımında aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmuştur:

- Her bir bara için aylık aktif ve reaktif enerji faturaları

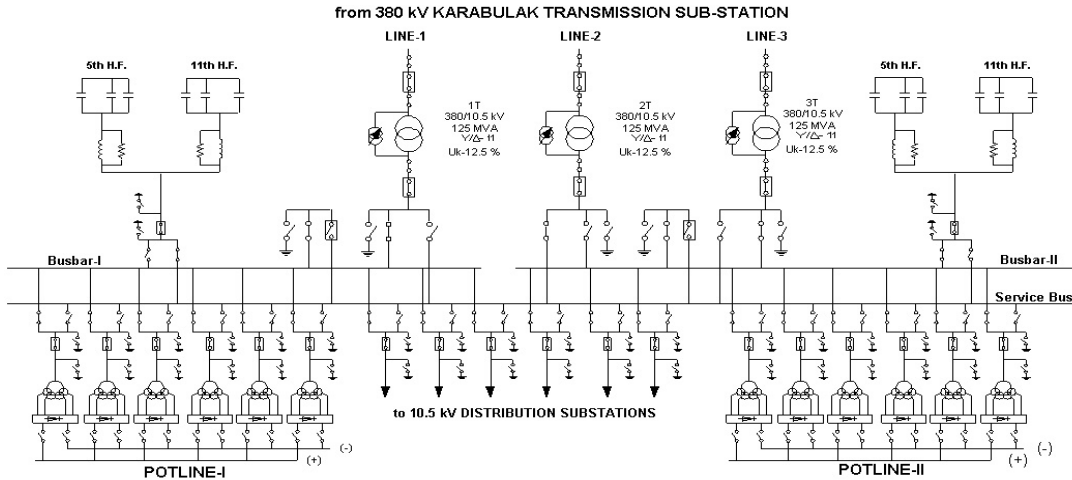
- Sahada kesintisiz 24 saat süreyle her bir bara için kaydedilen gerçek zamanlı verilerden elde edilen aktif-reaktif güç talebi/profil, akım gerilim harmonik bileşen değerleri
- EMTDC/PSCAD, SPICE ve MATLAB programları kullanılarak, fabrika dağıtım sistemi ve tasarlanan şönt filtre grupları detaylı olarak modellenmiş ve simule edilmiştir. Bu çalışmada 12-darbeli doğrultucular birer ideal harmonik akım kaynağı olarak modellenmişlerdir.

Bütün bu bilgiler ışığında ilgili standartlara uygun [5] şönt bağlı, pasif reaktif güç kompanzasyon ve harmonik filtre sistemleri tasarlanmıştır.

#### A) Fabrikadan Kaynaklanan Kısıtlamalar

Şekil.1'de gösterilen iki adet 125 MVA'lık güç transformatörleri bara transferi esnasında paralel çalıştırılabilmektedir. Bu esnada olası bir dengeli üç faz kısa devre akımı 10.5 kV seviyesinde 43 kA-rms değerinden 83 kA-rms değerine yükselmektedir. Bu durum, yüksek kesme kapasiteli kesicilerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Böylesi yüksek değerdeki bir kısa devre akımı, bara, kesici ve ayırıcı, sistem yerleşimi ve inşaat çalışmalarının daha karmaşık ve zor olmasına sebep olmuştur. Bu amaçla 20 kV 105 kA kesme kapasiteli az yağlı tip Rus malı kesiciler 6 ay içinde tedarik edilmiş ve kullanılmıştır.

125 MVA'lık ana güç trafoları ile 17.8 MVA'lık doğrultucu transformatörleri elektroliz ünitesinden kaynaklanan hata ya da bakım isteklerinden dolayı sıkça enerji kesintilerine uğramaktadırlar. Sistem kurulumundan önce günde maksimum 4 olmak üzere bir yılda toplam 393 kesinti olmuştur. 125 MVA'lık ana güç transformatörü ile buna bağlı doğrultucu transformatörlerinin tekrar enerjilendirilmesi sırasında yüksek genlikli DA hat akımları ile 2., 3. ve 4. harmonik bileşenlerine sahip mıknatıslama (magnetizing) akımları akmaktadır. Şekil.2'de bir kesinti sonrası ilgili ana güç



Şekil.1. ETİ Alüminyum A.Ş. Dağıtım Tek Hat Şeması

transformatörü ile bir adet doğrultucu transformatörünün tekrar devreye alınması esnasında hat akımlarında gözlenen 120 ms süreli geçici rejim bileşenleri gösterilmektedir. Geçici rejim bileşenlerinin meydana geldiği zamanlarda kompanzasyon sistemlerini baraya bağlı tutmak, yüksek anma güçlerinde ve ekonomik olarak daha pahalı filtre elemanlarının kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yüzden projenin ön tasarım aşamasında, sistemlerin bağlı bulunduğu baralardan herhangi birinde enerji kesintisi olursa ilgili kompanzasyon sisteminin otomatik olarak devreden çıkarılmasına karar verilmiştir. Devreden çıkan sistem, bütün doğrultucu transformatörlerinin devreye alınıp geçici rejim bileşenlerinin tamamen yok olmasından sonra devreye alınmaktadır. Harmonik filtreler devreye alınırken akord edildikleri frekansta yüksek genlikte geçici rejim akım bileşenlerine maruz kalırlar. Kompanzasyon sistemleri tasarımında bu durum göz önüne alınmış ve her filtre bankası, anahtarlama esnasında geçici rejim bileşenlerini azaltmak amacıyla 2.dereceden sönümlü filtreler olarak tasarlanmıştır.

#### B) Sistem Kurulu Gücü

Aylık enerji tüketimleri ve günlük reaktif güç değişim eğrileri sistemin kurulu gücü tasarımında temel alınan faktörlerdir (Şekil.3). Aylık ve günlük bazdaki aktif ve reaktif enerji tüketim profilleri sabit olduğundan, reaktif güç kompanzasyon problemi konvansiyonel şönt bağlı pasif filtreler ile çözmek mümkündür. 7.5 MVar kurulu gücündeki 2.dereceden sönümlü filtre olarak tasarlanan her bir sistem her ana baranın güç faktörünü maksimum işletme gerilimi olan 11 kV seviyesinde 0.98 gibi güvenli bir değere çıkarmaktadır.

#### C) Harmonik Filtrelerin Karakteristikleri

Alüminyum potalarını besleyen doğrultucular 12-darbeleri olduklarından teorik olarak 11. ve 13. akım harmonik bileşenlerinin baskın olması beklenmektedir. Bara-1 için yapılan ölçümler sonucu temel akım bileşenlerinin en çok beklenen yüzde ve sınır değerleri Tablo.1'de gösterilmektedir.

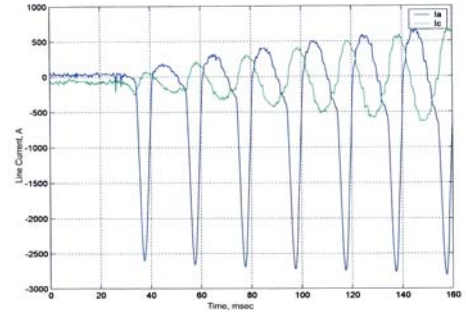
Harmonik problemini çözmek amacıyla değişik filtre topolojilerinin performansları detaylı simülasyonlarla tetkik edilmiş, yalnız kondansatör, sadece 11.harmonik filtresi, 5.ve 7.harmonik filtre grupları, 5. ve 11.harmonik filtre grupları seçeneklerinden en uygun olan 5. ve 11. harmoniklere akord edilmiş filtre grupları çözüm olarak kabul edilmiştir. 11. harmonik filtresi, 560 Hz gibi bir frekansa akord edilerek 11. ve 13. harmonik bileşenlerinin etkin olarak süzulebilmektedir.

Bununla birlikte doğrultucularda olası diyot arızalarında 12-darbeleri doğrultucular 6-darbeleri çalışabilmekte ve dolayısıyla 5. ve 7. harmonik akım bileşenleri baskın olmaktadır. Bu durumda baskın olan 5. harmonik bileşenlerini süzmek

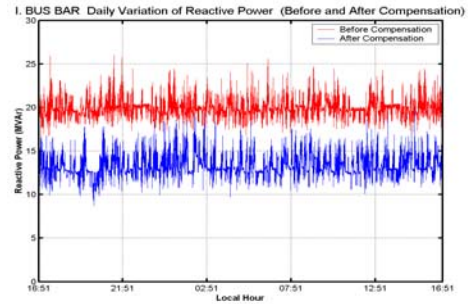
amacıyla 240 Hz frekansa akord edilmiş bir filtre grubu tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan 5. ve 11. harmonik filtre grupları 5., 11. ve 13. harmonik bileşenlerini başarıyla süzmekte ancak 7. harmonik bileşeninin süzmesine katkıda bulunmamaktadır. Ancak 7. harmonik bileşenin yüzde değeri sınır değerlerin çok altında olmasından dolayı bu bir problem teşkil etmemektedir. Tasarlanan bu 5. ve 11. harmonik filtreleri, anahtarlama esnasında oluşan geçici rejimlerini ve seri rezonans durumundaki amplifikasyonları en aza indirmek amacıyla 2. dereceden sönümlü birer filtre olarak yeniden düzenlenmiştir. Tasarlanan bu filtrelerin değişik sönümlü direnç değerleri için harmonik süzme ile anahtarlama kaynaklanan geçici rejimleri aza indirme performansları arasında bir optimizasyon yapılmış ve sönümlü direnç kullanımının 11.harmonik filtre için zorunlu 5. filtre grubu için ise opsiyonel olmasına karar verilmiştir.

Table.1. Bara-1 Akım Harmonikleri

Harmonik Sırası	Kompanzasyon Öncesi (%)	Kompanzasyon Sonrası (%)	Standart (I <sup>(3)</sup> ) (%)
3	0.48	0.44	10
5	1.15	0.87	10
7	0.78	0.82	10
11	5.7	0.79	4.5
13	2.9	1.37	4.5
17	0.45	0.35	4.0
19	0.35	0.31	4.0
23	0.55	0.48	1.5
25	0.46	0.36	1.5



Şekil.2. Trafonun Enerjilendirilmesi Esnasında Görülen Geçici Rejim Akım Bileşenleri



Şekil.3. Kompanzasyondan Önce ve Sonra Günlük Reaktif Güç Değişimi

#### IV. SİSTEM GERÇEKLEŞTİRİMİ

Doğrultucuların bulunduğu bina etrafında yeterli alan bulunmadığından filtre reaktörleri, dirençler ve kondansatörler dahili olarak monte edilmiştir (Şekil.4-5). Bu amaçla, her bir sistem için iki ayrı yer sistem montajına uygun hale getirilmiştir. Kısa devre akımından dolayı meydana gelen elektromanyetik kuvvetleri en aza indirmek ve kapalı döngülerin oluşumunu engellemek için sistem montajına özel önem gösterilmiştir. Kompanzasyon sistemleri şebeke kesilmeleri durumunda otomatik olarak devre dışı kalacak donanıma sahiptir. Sistemler ayrıca aşırı/düşük gerilim, kondansatör grupları için aşırı yük, aşırı akım gibi hatalara karşı koruma elemanları ile donatılmıştır. Sistemler yüksek bir elektromanyetik alan içerisinde bulunmaları sebebiyle kontrol ve koruma panolarının tasarımına ve yerleşimine dikkat edilmiştir. Sistemlerin montajını takiben gerekli testler (izolasyon, topraklama,...vb) yapılmış ve sistemler enerjilendirilmiştir.

#### V. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

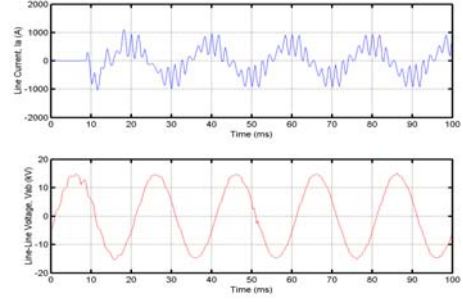
Enerjilendirme sonrası sistem durağan hal (steady-state) ve geçici rejim (transient-state) durumlarındaki performansları Veri Toplama Sistemi ile gözlenmiştir. Bu durumlara ilişkin bazı sonuçlar Şekil.3&6'da verilmiştir. Şekil.6 sönümlü 5. ve 11. filtrelerin anahtarlama esnasında geçici rejimlerden bağımsız olarak devreye alındıkları görülmektedir. Bu durum tasarım değerleri ile gerçek veriler arasında yakın bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Reaktif güç kompanzasyonu probleminin başarıyla çözüldüğü sistemlerin kurulumundan sonraki fatura değerlerinden görülmektedir (Şekil.7).



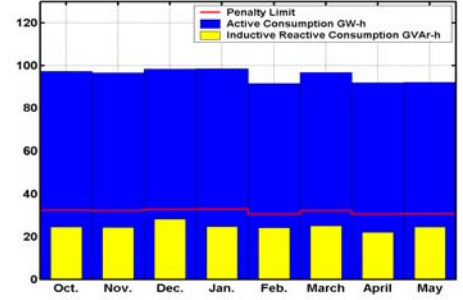
Şekil.4. Bara-1'e bağlı 5. ve 11. Harmonik Filtreleri



Şekil.5. Bara-2'ye bağlı 11. Harmonik Filtresi



Şekil.6. Filtrelerin Anahtarlama Esnasında Oluşan Akım-Gerilim Dalga Şekli



Şekil.7. Kompanzasyon Sonrası Aylık Enerji Tüketimleri

#### VI. SONUÇ

ETİ Alüminyum Fabrikasında aylık 1.25 milyon USD reaktif güç cezası ve 12-darbeleri doğrultucuların kullanılmasından kaynaklanan harmonikli akımların sebep olduğu güç kalitesi ile ilgili problemlerin çözümü amacıyla şönt bağlı, pasif, 2.dereceden sönümlü filtreler tasarlanıp uygulanmıştır. Cezai durumun önlenmesi, üretim sürecinde en önemli maliyeti teşkil eden elektrik enerjisi fiyatlarındaki artışı engellemiş, fabrikanın dünya pazarındaki rekabet gücünü artırmıştır. 11. ve 5. harmonik frekanslarına akord edilmiş şönt filtre grupları, güç kalitesi problemleri için optimum çözüm olmuştur. Sistemlerin sıklıkla anahtarlama gerekliliği, filtre gruplarının 2.dereceden sönümlü olması zorunluluğunu doğurmuştur. Sönümlü filtre grupları, geçici rejim bileşensiz anahtarlama ve seri rezonans risksiz çalışma özelliklerine sahiptirler. Ancak, bu durum yatırım maliyetini ve sistemin toplam ısı yükünü artırmıştır. Teorik ve gerçek zamanlı saha verileri arasında yakın birebir ilişki gözlenmiştir.

#### VII. KAYNAKLAR

- [1] S. Kobayashi and A. Takai, 'Latest Technology of Rectifier Equipment for Aluminum Smelters', Fuji Electric Review, vol.29, no.2, 1993, pp. 71-76
- [2] AME Research, 'www.ame.com.au/smelters/al/'
- [3] IEEE Std. 519-1992, 'IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems'
- [4] TEK, "Bozucu Etki Yaratan Müşterilerin Uymak Zorunda Olduğu Koşullar", 1993
- [5] IEC 61642, 'Industrial a.c. networks affected by harmonics – Application of filters and shunt capacitors', 1997