

SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA AKTİF OLMAYAN GÜÇLER ÜZERİNE BİR ANALİZ

M. Erhan BALCI^{1*} ve M. Hakan HOCAOĞLU²

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 10145 Balıkesir

²Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü 41400 Kocaeli
mbalci@balikesir.edu.tr, hocaoglu@gyte.edu.tr

(Geliş/Received: 09.02.2010 ; Kabul/Accepted: 17.03.2011)

ÖZET

Bu çalışmada sinüzoidal olmayan şartlarda görünür gücün aktif olmayan parçası üç farklı güç bileşenine ayrılmıştır. Bu güç bileşenlerinden biri olan reaktif gücün, en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çekeceği gücü verdiği niteliksel ve niceliksel analizlerle gösterilmiştir. Bununla beraber analiz sonuçlarından; sinüzoidal olmayan şartlarda basit bir kondansatörle güç faktörünün tam kompanzasyonunun, yük iletkenliğinin ve süseptansının frekansa bağlı doğrusal olmayan değişimlerinden kaynaklanan güçler sebebiyle mümkün olmadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Güç ifadeleri, sinüzoidal olmayan şartlar, güç faktörü, reaktif güç kompanzasyonu.

AN ANALYSIS ON THE NONACTIVE POWERS FOR NONSINUSOIDAL CONDITIONS

ABSTRACT

In this paper, the nonactive part of the apparent power is decomposed into three different components. The qualitative and quantitative analyses show that reactive power component of the power decomposition gives the power of the optimum compensation capacitor under the voltage wave shape of the system. In addition to that, it is seen from the analysis that the unity power factor compensation under nonsinusoidal conditions with a simple capacitor is not a feasible issue due to the powers drawn by the nonlinear variations of the load conductance and susceptance with the frequency.

Keywords: Power resolutions, nonsinusoidal conditions, power factor, reactive power compensation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Klasik görünür güç ifadesi ($S^2 = P^2 + Q^2$) sinüzoidal şartlarda reaktif güç kompanzasyonu ile sistem veriminin iyileştirilmesi için kullanılan fakat sinüzoidal olmayan şartlarda aynı amaç için yeterli olmayan bir araçtır. Bu sebeple literatürde sinüzoidal olmayan şartlar için çeşitli güç ifadeleri önerilmiştir [1-10].

Sinüzoidal olmayan şartlar için önerilmiş ilk güç ifadesi Budeanu'nun çalışmasında yer almaktadır [1]. Bu ifade görünür güç; aktif, reaktif ve bozulma güçlerinin vektör toplamı biçiminde bileşenlerine

ayrılmış olup ifadede yer alan reaktif güç her bir harmonik numarası için hesap edilen harmonik reaktif güçlerinin toplamı biçiminde tanımlanmıştır. Budeanu'nun tanımladığı reaktif güç bileşeninin basit kondansatör ile tamamen kompanze edildiği durumda güç faktörünün azami değeri elde edilemez [11], diğer bir deyişle Budeanu'nun tanımladığı reaktif güç doğrudan doğruya kapasitif kompanzasyon için kullanılamaz.

Budeanu'nun çalışması akabinde, bileşenleri zaman tanım bölgesinde hesap edilebilen bir güç ifadesi Fryze tarafından tanımlanmıştır [2]. Bu ifade, aktif ve reaktif güçlerin vektör toplamı biçiminde olup reaktif güç bileşeni gerilim ve gerilime dik fazda akım

parçasının etkin değerlerinin çarpımı biçiminde tanımlanmıştır. Fryze'nin reaktif gücünün basit kondansatörle minimize edildiği durumda güç faktörü azami değerine ulaşır [11]. Böylece Fryze'nin reaktif gücü Budeanu'nun reaktif gücünün kompanzasyon bakımından zaafını kapatabilmiştir.

Diğer taraftan, bir başka çalışmada Kimbark görünür gücü; ortalama (aktif), temel harmonik reaktif ve bozulma güçlerinin vektör toplamı biçiminde bileşenlerine ayırmıştır [3]. Bu ifadede yer alan reaktif güç bileşeni temel frekansta yapılan ölçümlerle kolayca hesap edilebilir ama diğer harmonikleri dikkate almadığı için en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çekeceği güç hakkında bir bilgi vermez [11].

Shepherd ve Zakikhani ise görünür gücü aktif görünür, reaktif görünür ve bozulma görünür güçlerinin vektör toplamı biçiminde ifade etmiştir [4, 5]. Buna göre aktif görünür güç harmonik akımlarının aktif parçalarının toplam etkin değeri ile gerilimin etkin değerinin çarpımı olarak, reaktif görünür güç ise harmonik akımlarının reaktif parçalarının toplam etkin değeri ile gerilimin etkin değerinin çarpımı olarak tanımlanmıştır. Bozulma görünür gücü ise gerilim ve akımın ortak olmayan harmonik numaralarına ait bileşenlerden kaynaklanan güç olarak tanımlanmıştır. Fakat gerçek sistem şartlarında kaynak empedansından dolayı gerilim ve akımda aynı harmonik numaraları bulunduğu bozulma görünür gücü pratikte sıfırdır. Diğer taraftan, Fryze'nin tanımladığı reaktif güçte olduğu gibi bu ifadede yer alan görünür reaktif güç bileşeninin basit kondansatörle minimize edildiği durumda güç faktörü azami değerine ulaşır [11].

Shepherd ve Zakikhani'nin güç ifadesinin ortalama (aktif) güç bileşenine sahip olmamasından dolayı bu ifade güç faktörünün hesaplanmasına uygun değildir. Bu sebeple, Sharon reaktif bileşen olarak Shepherd ve Zakikhani'nin reaktif görünür gücünü, aktif bileşen olarak ise ortalama gücü kabul eden bir güç ifadesi tanımlamıştır [6]. Bu ifadenin üçüncü bileşeni ise görünür güç ile aktif güç ve reaktif görünür gücün vektör farkı olan tamamlayıcı görünür güçtür.

Kaynak geriliminin ve yük iletkenliğinin temel harmonik dışındaki kısımlarından dolayı çekilen güç bileşenlerini ölçme ihtiyacı Depenbrock'un çalışmasını motive etmiştir [7]. Böylece Depenbrock görünür gücü aktif, reaktif, doğrusal olmayan iletkenlik ve artık güç bileşenlerine ayırmıştır. Depenbrock'un güç ifadesinin basit kondansatörle reaktif güç kompanzasyonu bakımından dezavantajı ise artık gücün içerisinde basit kondansatörle kompanze edilebilir parçalar bulunmasıdır [11].

Fryze, Shepherd-Zakikhani ve Sharon'un güç ifadelerinde tanımlı reaktif bileşenler en iyi kompanzasyon kondansatörünün gücü hakkında doğrudan bilgi vermezler. Bu sebeple Kusters ve Moore en iyi pasif kompanzasyonda kullanılacak

kondansatör veya indüktörün sistemde var olan gerilim altında çekeceği gücü veren bir güç ifadesi ortaya koymuştur [8]. Bu ifade oluşturulurken öncelikle zaman tanım bölgesinde birbirine dik fazda aktif, reaktif ve artık reaktif akım bileşenleri tanımlanmıştır. Reaktif akım yük indüktif ise gerilimin türeviyle aynı faz açısına sahiptir. Eğer yük kapasitif ise reaktif akım bileşeni gerilimin integraliyle aynı faz açısına sahiptir. Buna göre artık reaktif akımın etkin değeri; toplam akımın etkin değeri ile aktif akım ve reaktif akımın etkin değerlerinin vektör farkıdır. Böylece Kusters ve Moore gerilimin etkin değeriyle aktif, reaktif ve artık reaktif akım bileşenlerinin etkin değerlerinin çarpımından görünür gücü aktif, reaktif ve artık reaktif güç bileşenlerine ayırmıştır. Bu ifadede tanımlanan reaktif güç bileşeninin kompanzasyonla değişmeyen gerilim şartlarında en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemden çekeceği gücü verdiği [11]'de gösterilmiştir.

Czarnecki gerilim ve akımın sinüzoidal olmayan dalga şekline sahip olması durumunda sistem verimindeki azalmayı izah etmek amacıyla yüke ait iletkenlik ve suseptans parametrelerini kullanarak yük akımını aktif, reaktif, kaydırılmış ve üretilen harmonik akım bileşenlerine ayırmıştır [9]. Bu akım bileşenlerinden aktif akım bileşeni eşdeğer iletkenlikten dolayı çekilen ve gerilimle aynı fazda olan, reaktif akım bileşeni yükün suseptans parametresinden dolayı çektiği ve gerilime dik fazda olan ve kaydırılmış akım bileşeni ise yükün n.harmonik iletkenliği ile eşdeğer iletkenliği arasındaki farktan kaynaklanan akım bileşenleridir. Üretilen harmonik akımı ise akımda olup gerilimde bulunmayan harmonik bileşenlerini içeren akım bileşenidir. Böylece Czarnecki gerilimin etkin değeriyle bu akım bileşenlerinin etkin değerlerinin çarpımı sayesinde görünür gücü aktif, reaktif, kaydırılmış ve üretilen harmonik güç bileşenlerine ayırmıştır. Diğer taraftan Czarnecki'nin üretilen harmonik güç tanımı Shepherd ve Zakikhani'nin bozulma görünür gücünde olduğu gibi pratikte sıfırdır. Ayrıca her iki ifadenin reaktif güç bileşenleri aynı değeri verir [11].

Yukarıda kısaca özetlenen bu ifadeler genel olarak basit kondansatörle reaktif güç kompanzasyonu durumunda bir yada birkaç bileşeni minimize olacak biçimde tanımlanmıştır [11].

Bu ifadelere ek olarak, güç sistemlerinde harmonik kirliliğin ölçülmesi ve harmonik maliyet hesabının yapılması konularında araç teşkil etmesi amacıyla bir güç ifadesi IEEE std. 1459-2010 [10]'da tanımlanmıştır. Bu güç ifadesi, temel harmonik aktif, temel harmonik reaktif, gerilim bozulma, akım bozulma ve harmonik görünür güçlerine sahiptir. Bu güç bileşenlerinden gerilim bozulma gücü; temel harmonik dışındaki gerilim harmoniklerinin toplam etkin değeri ile temel harmonik akımının etkin değerinin çarpımıdır. Akım bozulma gücü ise temel

harmonik dışındaki akım harmoniklerinin toplam etkin değeri ile temel harmonik geriliminin etkin değerinin çarpımıdır. Son güç bileşeni olan harmonik görünür gücü ise; temel harmonik dışındaki gerilim harmoniklerinin ve akım harmoniklerinin toplam etkin değerlerinin çarpımı biçiminde tanımlanmıştır. Bu güç ifadesinin kapasitif kompanzasyon bakımından dezavantajı; gerilim bozulma, akım bozulma ve harmonik görünür güçlerinin basit kondansatörle kompanze edilebilen parçalar içermesidir.

Sinüzoidal olmayan şartlar için tanımlanmış güç ifadelerine ait buraya kadar verilen özetten ve literatürde yer alan analiz çalışmalarından [11-16], sinüzoidal olmayan şartlarda güç ifadelerinin tanımlanmasına ilişkin çalışmaların bir gelişim sürecinde olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada sinüzoidal olmayan şartlarda görünür gücün aktif güç dışındaki parçası çeşitli güç bileşenlerine ayrılmıştır. Bu aktif olmayan güç bileşenleri yardımıyla sinüzoidal olmayan şartların güç faktörüne ve reaktif güç kompanzasyonuna etkisi niteliksel ve niceliksel analizlerle incelenmiştir.

2. AKTİF OLMAYAN GÜÇ BİLEŞENLERİ (NONACTIVE POWER COMPONENTS)

Sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler için görünür gücün (S) aktif güç (P) dışındaki parçası bileşenlerine ayrılırken, öncelikle akım aktif ve aktif olmayan olmak üzere iki dik bileşene bölünmüştür. Bu ayırma işlemi gerilim referans işaret kabul edilerek Gram-Schmidt dikleştirme yöntemiyle [17] gerçekleştirilmiştir. Böylece gerilimin,

$$v(t) = V_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) \quad (1)$$

ve akımın,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} I_n \sin(\omega_n t + \delta_n) \quad (2)$$

biçiminde ifade edildiği durumda, $G_e = P/V^2$ olarak hesap edilen eşdeğer iletkenlik tanımı kullanılarak akımın aktif bileşeni,

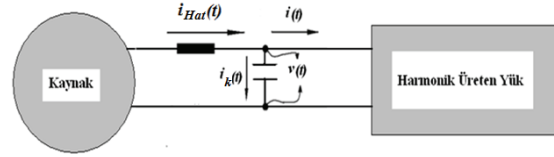
$$i_{ac}(t) = G_e v(t) \quad (3)$$

biçiminde yazılmıştır. Buna göre, akımın aktif olmayan bileşeni ise;

$$i_{nac}(t) = i(t) - i_{ac}(t) \quad (4)$$

olur.

Daha sonraki adımda aktif olmayan akım ($i_{nac}(t)$); reaktif ve kaydırılmış akım bileşenleri olmak üzere iki dik bileşene ayrılır. Bu iki bileşenden reaktif akım ($i_r(t)$) Şekil 1'de verilen örnek sistemde güç faktörünü azami değerine ulaştıran kondansatörün kompanze ettiği akımdır.



Şekil 1: Örnek sistem. (A representative system)

Buna göre kondansatör sisteme bağlandıktan sonra hat akımının etkin değeri (5)'den hesaplanır:

$$I_{Hat} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_{Hat}(t))^2 dt}, \quad i_{Hat}(t) = i(t) + i_k(t) \quad (5)$$

Kondansatör akımının anlık ifadesi;

$$i_k(t) = \sum_{n \in N^+} \frac{\sqrt{2} n V_n}{X_{C1}} \sin\left(\omega_n t + \theta_n + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

biçiminde yazılır. Denklem (6)'da verilen ifade (5)'de yerine konularak,

$$\frac{dI_{Hat}}{dX_{C1}} = 0 \quad (7)$$

işlemden kompanzasyonla gerilimin ihmal edilebilecek kadar küçük değerde değiştiği varsayımıyla en iyi kompanzasyon kondansatörünün temel harmonik kapasitesinin değeri;

$$X_{C1} = \frac{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}{\sum_{n \in N^+} n V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n)} = \frac{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}{\sum_{n \in N^+} n Q_n} \quad (8)$$

olarak bulunur. Gerilim değişiminin ihmal edilebilme durumu sistemde rezonans olmadığı ve kaynak empedansının yük empedansına göre çok küçük olduğu; güç sistemlerinde genellikle geçerli olan şartlar düşünülerek varsayılmıştır.

Hesap edilen en iyi kompanzasyon kondansatörünün temel harmonik kapasitansı (6)'da yerine konulduktan sonra elde edilen ifadenin ters işaretlisi yük akımının basit bir kondansatör ile kompanze edilebilir kısmının anlık ifadesini verir:

$$i_r(t) = -i_k(t) = \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} \frac{n V_n}{\left(\frac{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}{\sum_{n \in N^+} n Q_n} \right)} \sin\left(\omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

Denklem (8)'de verilen ifadededen,

$$B_{en} = \frac{n}{X_{C1}} = \frac{n \sum_{n \in N^+} n Q_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \quad (10)$$

biçiminde yazılan n. harmonik eşdeğer suseptans (B_{en}) tanımı kullanılarak (9)'da verilen anlık reaktif akım daha basit bir biçimde ifade edilebilir:

$$i_r(t) = \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} B_{en} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

Bu işlemlerden sonra yük akımının ifadesi (12)'de verilen hale gelir:

$$i(t) = G_e v(t) + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} B_{en} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2}\right) + i_s(t) \quad (12)$$

Diğer taraftan yükün n.harmonik admittansı,

$$Y_n = G_n - jB_n = \frac{V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n)}{V_n^2} - j \frac{V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n)}{V_n^2} \quad (13)$$

ve d.a. iletkenlik değeri,

$$G_0 = I_0 / V_0 \quad (14)$$

kullanılarak yük akımı,

$$i(t) = G_0 V_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} G_n V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} B_n V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2}\right) \quad (15)$$

biçiminde yazılır. Denklem (12) ve (15) taraf tarafa çıkarılırsa kaydırılmış akım bileşeni ($i_s(t)$)'nin (16)'da verilen ifadeye sahip olduğu görülür:

$$i_s(t) = (G_0 - G_e) V_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} (G_n - G_e) V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} (B_n - B_{en}) V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2}\right) \quad (16)$$

Bulunan kaydırılmış akım bileşeninin iletkenlikle ilgili kısmı kaydırılmış iletkenlik akımı olup (17)'de verilen anlık ifadeye sahiptir:

$$i_{sc}(t) = (G_0 - G_e) V_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} (G_n - G_e) V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) \quad (17)$$

Kaydırılmış akım içindeki süseptansla ilgili parça ise kaydırılmış süseptans akımı olup (18)'de verilen anlık ifadeye sahiptir:

$$i_{ss}(t) = \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} (B_n - B_{en}) V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2}\right) \quad (18)$$

Bu işlemlerden sonra yük akımı zaman tanım bölgesinde,

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_r(t) + i_{sc}(t) + i_{ss}(t) \quad (19)$$

biçiminde dört bileşene ayrılmış olur. Bu akım bileşenlerinden iletkenlik temelli olanlar gerilimle aynı fazda ve süseptans temelli olanlar gerilime dik fazda olması sebebiyle bu iki akım grubuna dahil bileşenler arasında diklik durumu mevcuttur [15]. Diğer bileşenler arasındaki diklik durumları ise ek kısmında gösterilmiştir.

Elde edilen akım bileşenleri arasında zaman tanım bölgesinde diklik durumu mevcut olduğundan dolayı, bu akım bileşenlerinin etkin değerlerinin vektör toplamı yük akımının etkin değerine eşittir:

$$I^2 = I_{ac}^2 + I_r^2 + I_{sc}^2 + I_{ss}^2 \quad (20)$$

Denklem (20)'de yer alan akım bileşenlerinin etkin değerleri sırasıyla;

aktif akım için,

$$I_{ac} = G_e \sqrt{\sum_{n \in N} V_n^2} \quad (21)$$

reaktif akım için,

$$I_r = \sqrt{\sum_{n \in N^+} B_{en}^2 V_n^2} \quad (22)$$

kaydırılmış iletkenlik akımı için,

$$I_{sc} = \sqrt{\sum_{n \in N} (G_n - G_e)^2 V_n^2} \quad (23)$$

ve kaydırılmış süseptans akımı için,

$$I_{ss} = \sqrt{\sum_{n \in N^+} (B_n - B_{en})^2 V_n^2} \quad (24)$$

ifadeleriyle hesaplanabilir.

Böylece (20)'de verilen akım ifadesinin her iki tarafı gerilimin etkin değerinin karesiyle çarpılarak sinüzoidal olmayan şartlarda tek fazlı sistemler için görünür güç ($S=VI$) bileşenlerine ayrılır:

$$S^2 = (VI_{ac})^2 + (VI_r)^2 + (VI_{sc})^2 + (VI_{ss})^2 = P^2 + Q_r^2 + D_{sc}^2 + D_{ss}^2 \quad (25)$$

Bu güç ifadesinde yer alan güç bileşenleri ise;

aktif (P),

$$P = VI_{ac} \quad (26)$$

reaktif (Q_r),

$$Q_r = VI_r \quad (27)$$

kaydırılmış iletkenlik (D_{sc}),

$$D_{sc} = VI_{sc} \quad (28)$$

ve kaydırılmış süseptans (D_{ss}),

$$D_{ss} = VI_{ss} \quad (29)$$

güçleridir. Böylece görünür gücün aktif güç dışındaki parçası,

- En iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çekeceği gücü veren reaktif güç (Q_r),
- Yük iletkenliğinin frekansa bağlı doğrusal olmayan değişiminden kaynaklanan kaydırılmış iletkenlik gücü (D_{sc}),

- Ve yük suseptansının frekansa bağlı doğrusal olmayan değişiminden kaynaklanan kaydırılmış suseptans gücü (D_{ss}),

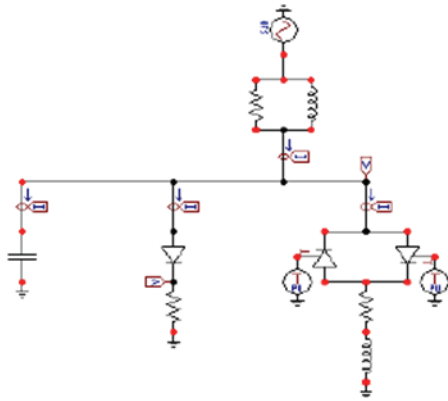
bileşenlerine ayrılmıştır. Bu sıralanan güç bileşenlerinden kaydırılmış iletkenlik gücünün suseptans temelli olmaması sebebiyle kondansatör ile kompanze edilemeyeceği açıktır. Kaydırılmış suseptans gücü ise reaktif ve kaydırılmış suseptans akımlarının birbirine dik olması sebebiyle kondansatör ile kompanze edilemez.

3. ÖRNEK BİR SİSTEMDE ANALİZ (ANALYSIS IN A SAMPLE SYSTEM)

Bu kısımda, sinüzoidal olmayan şartların güç faktörüne ve reaktif güç kompanzasyonuna etkisi, tanımlanan aktif olmayan güç bileşenleri yardımıyla niceliksel analizlerle gösterilecektir. Bu analizler Şekil 2’de verilen; a.a.kırpıcı, yarım dalga doğrultucu ile kompanzasyon kondansatöründen oluşan sistemde yapılmıştır.

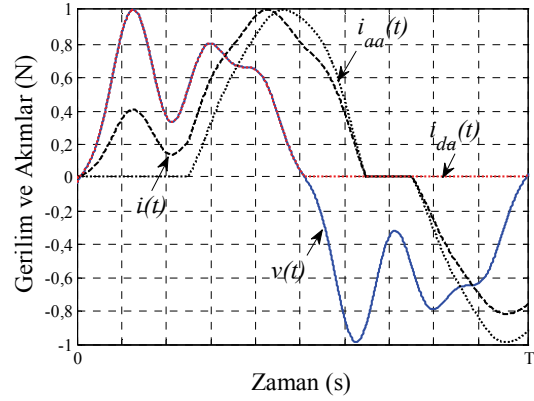
Bu sistemde terminal gerilimi ($v(t)$), hat akımı ($i(t)$), a.a. kırpıcının kaynaktan çektiği akım ($i_{aa}(t)$) ve yarım dalga doğrultucunun kaynaktan çektiği akıma ($i_{da}(t)$) ait normalize (N) edilmiş dalga şekilleri Şekil 3’de verilmiştir.

Sinüzoidal olmayan şartların güç faktörüne etkisini izah etmek amacıyla, görünür güç (S), tanımlanan güç ifadesine ait bileşenler ve güç faktörünün ($gf=P/S$) yarım dalga doğrultucunun d.a. ve a.a. tarafları için hesaplanan değerleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 2: Analiz sistemi. (Analysis system)

Tablo 1’den görüldüğü gibi yarım dalga doğrultucunun a.a. ve d.a. tarafları için hesaplanan reaktif güçler sıfırdır. Bu durum yarım dalga doğrultucuda indüktif eleman olmadığını göstermektedir. Her iki tarafta hesaplanan aktif güçler 0,21 pu’dur. Bununla beraber, a.a. ve d.a. tarafları için hesaplanan görünür güçler sırasıyla 0,30 pu ve 0,21 pu’dur. Bu durumdan dolayı güç faktörü a.a. tarafı için



Şekil 3: Normalize gerilim ve akım dalga şekilleri. (The normalised wave shapes of the voltage and currents)

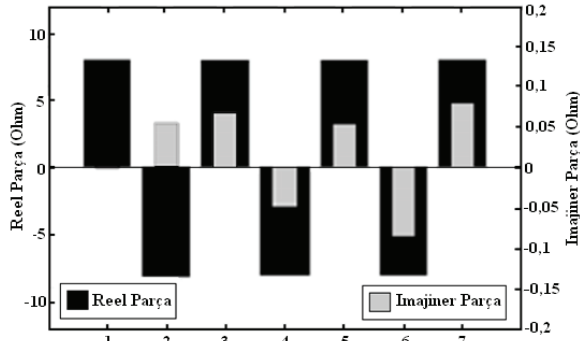
Tablo 1: Görünür güç, güç bileşenleri ve güç faktörünün yarım dalga doğrultucunun d.a. ve a.a. tarafları için hesaplanan değerleri. (The calculated values of Apparent power, power components and power factor for d.c. and a.c. sides of the half wave rectifier)

	d.a. tarafı	a.a. tarafı
P	0,21 pu	0,21 pu
Q_r	0 pu	0 pu
D_{sc}	0 pu	0,20 pu
D_{ss}	0 pu	0,08 pu
S	0,21 pu	0,30 pu
gf	1,00	0,707

0,707 iken d.a. tarafı için 1,00’dır. Güç faktörleri arasındaki farkın sebebi ise kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güçlerinin a.a. tarafı için sırasıyla 0,20 pu ve 0,08 pu olmasına rağmen d.a. tarafı için sıfır olmalarıdır. Diğer taraftan a.a. tarafı ile d.a. tarafı arasında ideal diyot olmasına rağmen a.a. tarafından kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güçlerinin çekilmesi durumu; diyot üzerinde düşen n.harmonik geriliminin fazör değerinin diyot üzerinden akan n.harmonik akımının fazör değerine oranı,

$$\bar{Z}_{dn} = \frac{\bar{V}_{dn}}{\bar{I}_{dn}} \quad (30)$$

biçiminde hesap edilen diyotun n.harmonik empedansının reel ve imajiner parçaları incelenerek görülebilir. Bunun için (30)’dan hesaplanan diyota ait n. harmonik empedanslarının reel ve imajiner parçaları Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4: Diyota ait n. harmonik empedansının reel ve imajiner parçaları. (Real and imaginer parts of the nth harmonic diode impedance)

Şekil 4'den diyotun ideal olmasına rağmen bir yarım periyot iletimde diğer yarım periyotta ise kesimde olmasından dolayı her bir harmonik için empedans gibi davrandığı görülmektedir. Böylece diyotun a.a. ucunda ölçülen Tablo 1'de verilmiş olan kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güç bileşenlerinin; diyotun frekans tanım bölgesinde hesap edilen empedans eşdeğeri sebebiyle çekildiği görülmektedir.

Elde edilen güç ifadesinin reaktif güç bileşeninin en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemden çektiği gücü verdiği, ayrıca kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güç bileşenlerinin basit kondansatörle kompanze edilememelerinden dolayı bu kompanzasyon stratejisiyle güç faktörünün bir yapılamayacağı, aynı sistemde yapılan analizlerle gösterilebilir. Bunun için sistemin kompanzasyonsuz ve en iyi kapasitif kompanzasyon yapılmış durumlarında ortak bağlantı noktasında hesaplanan görünür güç, güç bileşenleri, güç faktörü ve kompanzasyon kondansatörünün gücü (S_{Kon}) analiz edilmiştir. En iyi kapasitif kompanzasyon yapmak için (8)'den hesaplanan en iyi kompanzasyon kondansatörü sisteme bağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de toplu halde verilmiştir.

Tablo 2'de verilenlerden, kompanzasyondan önce hesaplanan reaktif gücün 0,42 pu olduğu görülmektedir. Ayrıca reaktif gücün sistemde var olan gerilim şartlarında 0,43 pu güç çeken kompanzasyon kondansatörünün sisteme bağlanmasıyla -0,01 pu'ya indiği görülmektedir. Kompanzasyondan önce hesaplanan reaktif güç ile kompanzasyon kondansatörünün gücü arasındaki ihmal edilebilecek fark ise kompanzasyondan sonra sistem geriliminde meydana gelen değişimden kaynaklanmaktadır. Bu durum aktif güçte kompanzasyondan sonra meydana gelen 0,01 pu'luk değişimden anlaşılmaktadır. Bununla birlikte kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güçlerinin kompanzasyondan sonraki ihmal edilebilecek değerde olan değişimleri aynı sebeple meydana gelmiştir. Diğer taraftan yapılan kompanzasyon neticesinde güç faktörü 0,547 değerinden 0,601 değerine yükselmiştir.

Tablo 2: Kompanzasyondan önceki ve sonraki durumlar için hesaplanan güç değerleri. (Power quantities measured before and after compensation)

	Kompanzasyondan	Kompanzasyondan
	Önce	Sonra
P	0,54 pu	0,55 pu
Q_r	0,42 pu	-0,01 pu
D_{sc}	0,39 pu	0,40 pu
D_{ss}	0,59 pu	0,61 pu
S	1,00 pu	0,91 pu
gf	0,547	0,601
S_{Kon}	-	0,43 pu

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada sinüzoidal olmayan şartlarda görünür gücün aktif güç dışındaki parçası çeşitli güç bileşenlerine ayrılmıştır. Bu aktif olmayan güç bileşenleri yardımıyla sinüzoidal olmayan şartların güç faktörüne ve reaktif güç kompanzasyonuna etkisi niteliksel ve niceliksel analizlerle izah edilmiştir. Elde edilen sonuçlar;

- Tanımlanan güç ifadesinin reaktif güç bileşeninin en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çektiği gücü verdiği,
- Yük iletkenliğinin ve süseptansının frekansa bağlı doğrusal olmayan değişimlerinden kaynaklanan kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güçlerinin en iyi kompanzasyon kondansatörünün sisteme bağlanmasıyla kompanze edilemediği,
- Kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güçlerinin, gerilim ve akım dalga şekline kaynaklanan ve fiziksel olmayan iletkenlik ile suseptans değerlerinden dolayı çekilebileceği,

görülmüştür.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Budeanu, C.I., **Reactive and Fictitious Powers**, Publication No.2 of the Rumanian National Inst., Romanya, 1927.
2. Fryze, S., "Wirk-, Blind-, und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen Mit Nichtsinusoidalformigem Verfauf Von Strom und Strom und Spannung," **Elektrotechnische Zeitschrift**, Cilt 53, No 25, 596-599, 1932.
3. Kimbark, E.W., **Direct Current Transmission**, J. Wiley and Sons, New York, A.B.D., 1971.
4. Shepherd, W. ve Zakikhani, P., "Power Factor Correction in Nonsinusoidal Systems by the Use

- of Capacitance”, **J. of Phys. D: Appl. Phys.**, Cilt 6, 1850-1861, 1973.
5. Shepherd, W. ve Zand, P., **Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits**, Cambridge University Press, New York, A.B.D., 1979.
 6. Sharon, D., “Reactive Power Definition and Power-Factor Improvement in Nonlinear Systems”, **Proc. Inst. Elec. Eng.**, Cilt 120, 704-706, 1973.
 7. Depenbrock, M., **Wirk- und Blindleistung**, ETG-Fachtagung Blindleistung, Almanya, 1979.
 8. Kusters, N. L. ve Moore, W. J. M., “On the Definition of Reactive Power under Nonsinusoidal Conditions”, **IEEE Trans. Power App. and Syst.**, Cilt 99, No 5, 1845-1854, 1980.
 9. Czarnecki, L. S., “Physical Reasons of Currents RMS Value Increase in Power Systems with Nonsinusoidal Voltage”, **IEEE Trans. on Power Del.**, Cilt 8, No 1, 437-447, 1993.
 10. IEEE Std. 1459-2010, **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**, 2010.
 11. Balcı, M. E. ve Hocaoglu, M. H., “Quantitative Comparison of Power Decompositions”, **Electric Power Systems Research**, Cilt 78, No 3, 318-329, 2008.
 12. Emanuel, A. E., “Powers in Nonsinusoidal Situations a Review of Definitions and Physical Meaning”, **IEEE Trans. on Power Del.**, Cilt 5, No 3, 1377-1389, 1990.
 13. Czarnecki, L. S., “Comparison of Power Definitions for Circuits with Nonsinusoidal Waveforms”, **IEEE Tutorial Course 90EH0327-7-PWR**, 43-50, 1990.
 14. Czarnecki, L. S., “Budeanu and Fryze: Two Frameworks for Interpreting Power Properties of Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents”, **Electrical Engineering**, Cilt 80, No 6, 359-367, 1997.
 15. Balcı, M. E. ve Hocaoglu, M. H., “New Power Decomposition for Sinusoidal and Nonsinusoidal Conditions”, **ICHQP 2006**, Cascais, Portekiz, Eylül 2006.
 16. Morsi, W. G. ve El-Hawary, M. E., “Defining Power Components in Nonsinusoidal Unbalanced Polyphase Systems: The Issues”, **IEEE Trans. on Power Del.**, Cilt 22, No 4, 2428-2438, 2007.
 17. Proakis, J. G., **Digital Communications**, Mc Graw Hill Higher Education, New York, A.B.D., 2001.

6. EKLER (APPENDIXES)

Aralarındaki diklik durumu gösterilen ilk akım çifti; aktif ve kaydırılmış iletkenlik akım bileşenleridir. Diklik durumunun gösterimi için ilk önce bu akım

bileşenlerinin bir periyot boyunca zaman tanım bölgesinde çarpımlarının integrali alınır;

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{ac}(t) i_{sc}(t) dt = TG_e \left[\sum_{n \in N} (G_n - G_e) V_n^2 \right] \quad (31)$$

ve (31) düzenlenerek (32) elde edilir;

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{ac}(t) i_{sc}(t) dt = TG_e \left[\sum_{n \in N} G_n V_n^2 - G_e \sum_{n \in N} V_n^2 \right] \quad (32)$$

Son olarak; aktif gücün, $P = \sum_{n \in N} P_n = \sum_{n \in N} G_n V_n^2$ ve

$P = VI_{ac} = G_e \sum_{n \in N} V_n^2$ ifadeleri (32)’de yerlerine

konularak aktif ve kaydırılmış iletkenlik akımları arasındaki diklik durumu gösterilmiş olur:

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{ac}(t) i_{sc}(t) dt = TG_e [P - P] = 0 \quad (33)$$

Aralarındaki diklik durumu gösterilen ikinci akım çifti; reaktif ve kaydırılmış suseptans akım bileşenleridir. Diklik durumunun gösterimi için ilk önce bu akım bileşenlerinin bir periyot boyunca zaman tanım bölgesinde çarpımlarının integrali alınır;

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_r(t) i_{ss}(t) dt = T \sum_{n \in N^+} (B_n - B_{en}) B_{en} V_n^2 \quad (34)$$

ve B_{en} ile B_n ’nin sırasıyla (10) ve (13)’de verilen ifadeleri (34)’de yerine konularak (35) bulunur:

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_r(t) i_{ss}(t) dt = TB_{e1} \sum_{n \in N^+} \left[\left(\frac{V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n)}{V_n^2} - \frac{n \sum_{n \in N^+} n V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n)}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \right) n V_n^2 \right] \quad (35)$$

Son olarak, (35) düzenlenerek reaktif ve kaydırılmış suseptans akımları arasındaki diklik durumu gösterilmiş olur:

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_r(t) i_{ss}(t) dt = TB_{e1} \left[\sum_{n \in N^+} n V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) - \sum_{n \in N^+} n V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \right] = 0 \quad (36)$$

