

# Görünür Güç İfadelerinin Sinüzoidal Olmayan-Dengesiz Şartlarda Kapasitif Kompanzasyon Bakımından Analizi

M. E. Balci<sup>1</sup> ve M. H. Hocaoğlu<sup>2</sup>

Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü 41400, Gebze, Kocaeli

<sup>1</sup>m.balci@gyte.edu.tr

<sup>2</sup>hocaoglu@gyte.edu.tr

*Anahtar Sözcükler: Dengesizlik, Harmonikler, Reaktif Güç Kompanzasyonu, Güç İfadeleri.*

## Özetçe

Literatürde sinüzoidal olmayan ve dengesiz şartlarda üç fazlı sistemler için çeşitli görünür güç tanımları ve bu tanımlara ait güç ifadeleri önerilmiştir. Fakat bu güç ifadelerinin kapasitif kompanzasyon bakımından analizi literatürde eksik kalmış önemli bir çalışma konusudur. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak bilinen güç ifadelerinin sinüzoidal olmayan ve dengesiz üç fazlı sistemlerde en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon gücünün belirlenmesinde araç olarak kullanılabilirliği niteliksel ve niceliksel analizlere tabii tutulmuştur. Sonuçlar, en iyi dengeli kapasitif kompanzasyonun sistemde var olan gerilim şartlarında çektiği gücün belirlenmesi işi için literatürde yer alan güç ifadelerinin uygun olmadığını göstermiştir.

## 1 Giriş

Geleneksel olarak görünür güç ( $S=VI$ ) ile güç ifadesi ( $S^2=P^2+Q^2$ ) sistem veriminin veya güç faktörü ( $gf=P/S$ )'nin hesabı, sistem veriminin iyileştirilmesi ve sistem elemanlarının boyutlandırılmasında araç olarak kullanılmıştır [1]. Bu tek fazlı sistemler için oluşturulmuş klasik görünür güç ve güç ifadesinin üç fazlı sistemler için hesapları ise her bir fazın ayrı bir tek fazlı sistem olarak kabulüyle yapılmıştır. Bu yaklaşıma göre literatürde üç fazlı sistemler için Aritmetik ve Vektör görünür güç tanımları ortaya konmuştur [1]. Diğer taraftan, sinüzoidal olmayan akım ve gerilimlerin güç sistemlerinde bulunduğu durumlar için klasik görünür güç tanımı için güç ifadesi ilk defa Budeanu tarafından önerilmiştir [2]. Ayrıca üç fazlı sistemlerde, sinüzoidal olmayan şartlar yanında dengesizliğin var olduğu durumlar için görünür gücün hesabında her bir fazın ayrı bir tek fazlı sistem olarak dikkate alınmasının doğru bir kabul olmadığını Buchholz tarafından ilk defa ifade edilmiştir [3]. Böylece, sinüzoidal olmayan ve dengesiz akım ve/veya gerilim şartlarına sahip tek ve üç fazlı sistemler için çeşitli görünür güç tanım ve güç ifadeleri oluşturulmuştur [2]-[4].

Bu güç ifadelerinden tek fazlı sistemler için olanları [2] çalışmada kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar sadece Kusters-Moore'un güç ifadesinin en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çektiği gücü direkt verdiğini göstermiştir. Diğer taraftan üç fazlı sistemlerde frekans domeniye göre teorisi üzerine yapılan çalışmalar genellikle görünür güç tanımlarının sistem veriminin ölçülmesi bakımından doğruluklarının karşılaştırmasına odaklanmıştır [3], [6], [7]. Dolayısıyla üç fazlı sistemler için oluşturulmuş güç ifadelerinin kapasitif kompanzasyon bakımından karşılaştırılması literatürde eksik kalmıştır.

Bu çalışmada, öncelikle literatürde yaygın olarak bilinen görünür güç ifadeleri ana hatları verilerek özetlenmiş. Daha sonra özetlenen görünür güç ifadelerinin sinüzoidal olmayan ve dengesiz üç fazlı sistemlerde en iyi dengeli kapasitif

kompanzasyon bakımından niteliksel ve niceliksel analizi yapılmıştır.

## 2 Üç Fazlı Sistemler için Görünür Güç Tanım ve Güç İfadeleri

Sinüzoidal olmayan ve dengesiz üç fazlı sistemler için literatürde yaygın olarak bilinen görünür güç tanım ve güç ifadeleri Aritmetik [8], Vektör [8], IEEE std. 1459 [8] ve Buchholz [9]'un tanımladığı (DIN std. 40110 [10]'da yer alan) görünür güç tanımlarıdır. Aritmetik görünür güç için literatürde her hangi bir güç ifadesi önerilmemiştir. Bunun yanında Vektör görünür gücün güç ifadesinde aktif, reaktif ve bozulma güç bileşenleri yer almaktadır. Bu güç bileşenlerinden aktif güç bileşeni her fazdan çekilen aktif güçlerin toplamı, reaktif güç bileşeni her fazdan çekilen Budeanu'nun tanımladığı reaktif güçlerin toplamı ve bozulma güç bileşeni ise her fazdan çekilen Budeanu'nun tanımladığı bozulma güçlerinin toplamıdır. Fakat Budeanu'nun reaktif güç tanımının en iyi kompanzasyon kondansatörü hakkında doğru bilgi vermediği literatürdeki çeşitli çalışmalarda sunulmuş olan niteliksel ve niceliksel analizlerle gösterilmiştir [2], [5]. IEEE std. 1459'un görünür güç tanımı ise harmonik kirliliğin ölçülmesi ve harmonik maliyet paylaşımında araç teşkil etmek amacıyla oluşturulan bir güç ifadesine sahiptir. Bu güç ifadesinin bileşenleri; temel harmonik pozitif sıra aktif, temel harmonik pozitif sıra reaktif, temel harmonik dengesizlik görünür, akım bozulma, gerilim bozulma ve harmonik görünür güçleridir. Temel harmonik pozitif sıra reaktif gücünün ise gerilim ve akımın harmonik bozulmaya sahip olduğu sistemlerde en iyi kapasitif kompanzasyonun sistemde var olan gerilim şartlarında çektiği gücü vermeyeceği açıktır. Buchholz'un görünür güç tanımı ise literatürde üç farklı güç ifadesine sahiptir. Bunlar; DIN std. 40110 güç ifadesi ile Czarnecki [11] ve Ari-Stankovich [12]'in tanımladığı güç ifadeleridir. Czarnecki'nin üç fazlı sistemler için oluşturduğu güç ifadesinin reaktif bileşeni yine Czarnecki'nin tek fazlı sistemler için oluşturduğu güç ifadesinde tanımlanmış olan reaktif gücün üç fazlı sistemlere açılımıdır. Bununla beraber tek fazlı sistemler için Czarnecki'nin güç ifadesinin en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çektiği gücü direkt vermediği bilinmektedir [2]. Bu sebeple Czarnecki'nin üç fazlı sistemler için oluşturduğu güç ifadesinin reaktif bileşeni en iyi kapasitif kompanzasyonun gücünü direkt vermez.

Yukarıda verilen çözümlerden sonra geriye DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait güç ifadeleri kalmıştır. Bu sebeple önce bu iki güç ifadesi ana hatlarıyla özetlenecek ve sonra dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından karşılaştırmalı niceliksel analize tabi tutulacaktır.

## 2.1 DIN std. 40110 Güç İfadesi

Buchollz m tane iletkenli sistemler için; kolektif ani gerilim ve kolektif ani akım tanımlarını yaparak;

$$v_{\Sigma}(t) = \begin{bmatrix} v_{a0}(t) \\ v_{b0}(t) \\ \vdots \\ v_{m0}(t) \end{bmatrix}, \quad i_{\Sigma}(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ \vdots \\ i_m(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

sistemi bir bütün olarak ele almıştır [9]. Denklem (1)'de yer alan  $v_{m0}(t)$ ; m iletkeni ile hayali nötr noktası arası gerilimin ani değeri olup (2)'de verilen ifadeden hesaplanmıştır:

$$v_{m0}(t) = v_m(t) - \frac{1}{N_m} \sum_m v_m(t) \quad m=a,b,c,\dots,N \quad (2)$$

Bu ifadede  $N_m$  toplam iletken sayısı olup  $v_m(t)$  ise m iletkeni ile nötr iletkeni (N) arası gerilimin ani değeridir. Böylece, Buchollz kolektif gerilim etkin değeri,

$$V_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{\Sigma}^{Tr}(t) v_{\Sigma}(t) dt} = \sqrt{\sum_{m=a,b,c,\dots,N} V_{m0}^2} \quad (3)$$

ve kolektif akım etkin değeri,

$$I_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma}^{Tr}(t) i_{\Sigma}(t) dt} = \sqrt{\sum_{m=a,b,c,\dots,N} I_m^2} \quad (4)$$

tanımlarını yaptıktan sonra görünür gücü hesap etmiştir:

$$S_{\Sigma} = V_{\Sigma} I_{\Sigma} \quad (5)$$

Bu görünür güç tanımı DIN std. 40110'da yer alan güç ifadesiyle bileşenlerine ayrılmıştır. DIN std. 40110 güç ifadesinin ilk bileşeni,

$$P = \sum_{m=a,b,c,\dots,N} P_m, \quad P_m = \frac{1}{T} \int_0^T v_{m0}(t) i_m(t) dt \quad (6)$$

biçiminde tanımlanan aktif güç olup diğer güç bileşenleri m hat iletkenliği,

$$G_m = P_m / V_{m0}^2 \quad (7)$$

ve eşdeğer iletkenlik,

$$G_e = P / V_{\Sigma}^2 \quad (8)$$

kullanılarak tanımlanmıştır. Bu aktif olmayan güç bileşenleri sırasıyla gerilimle aynı fazda dengesiz akım parçasından kaynaklanan deaktif güç,

$$Q_{tot\Sigma\parallel} = V_{\Sigma} \sqrt{\sum_{m=a,b,c,\dots,N} (G_m - G_e)^2 V_{m0}^2} \quad (9)$$

ve gerilime dik akım parçasından kaynaklanan deaktif güçtür:

$$Q_{tot\Sigma\perp} = V_{\Sigma} \sqrt{\sum_{m=a,b,c,\dots,N} [I_m^2 - G_m^2 V_{m0}^2]} \quad (10)$$

Böylece Buchollz'un görünür gücü bu üç güç bileşeninin vektör toplamı olarak ifade edilmiştir:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P^2 + Q_{tot\Sigma\parallel}^2 + Q_{tot\Sigma\perp}^2} \quad (11)$$

Bu tanıma göre hat akımlarının hat-hayali nötr noktası gerilimleriyle faz farkının olmadığı durumda güç faktörü bir olur. Buradan Buchollz görünür güç tanımına göre güç faktörünün bir olduğu durumda, akımın dengesizliğe ve harmonik bozulmaya sahip olabileceği dolayısıyla sistemde nötr akımı akabileceği anlaşılmaktadır.

## 2.2 Ari-Stankovich'in Tanımladığı Güç İfadesi

Ari ve Stankovich bir kompanzasyon aracı elde etmek amacıyla Buchollz'un görünür gücünü bileşenlerine ayırmıştır. Bu güç bileşenlerini tanımlarken Ari ve Stankovic Hilbert uzayı tekniklerini kullanarak akımı üç dik bileşene ayırmıştır [12]. Bu akım bileşenleri;

Aynı ortalama güç iletilmesi için gereken minimum etkin değere sahip aktif akım,

$$i_{\Sigma ac}(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma}^{Tr}(t) v_{\Sigma}(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T v_{\Sigma}^{Tr}(t) v_{\Sigma}(t) dt} v_{\Sigma}(t) = \frac{P}{V_{\Sigma}^2} v_{\Sigma}(t) \quad (12)$$

geçici reaktif akım,

$$i_{\Sigma y}(t) = i_{\Sigma p}(t) - i_{\Sigma ac}(t) \quad (13)$$

ve dolanan reaktif akımdır:

$$i_{\Sigma x}(t) = i_{\Sigma}(t) - i_{\Sigma p}(t) \quad (14)$$

Denklem (13) ve (14)'deki  $i_{\Sigma p}(t)$  akımı ise,

$$i_{\Sigma p}(t) = \frac{i_{\Sigma}^{Tr}(t) v_{\Sigma}(t)}{v_{\Sigma}^{Tr}(t) v_{\Sigma}(t)} v_{\Sigma}(t) = \frac{P(t)}{v_{\Sigma}^{Tr}(t) v_{\Sigma}(t)} v_{\Sigma}(t) \quad (15)$$

biçiminde ifade edilmiş ve aynı ani gücü iletebilecek minimum etkin değere sahip akım olarak fiziksel manası açıklanmıştır. Tanımlanan  $i_{\Sigma ac}(t)$ ,  $i_{\Sigma x}(t)$  ve  $i_{\Sigma y}(t)$  akım bileşenleri zaman domeyninde birbirine diktir. Böylece kolektif akımının etkin değeri;

aktif akımın etkin değeri,

$$I_{ac} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma ac}^{Tr}(t) i_{\Sigma ac}(t) dt} \quad (16)$$

geçici reaktif akımın etkin değeri,

$$I_y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma y}^{Tr}(t) i_{\Sigma y}(t) dt} \quad (17)$$

ve dolanan reaktif akımın etkin değeri,

$$I_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma x}^{Tr}(t) i_{\Sigma x}(t) dt} \quad (18)$$

olmak üzere üç bileşene ayrılmıştır:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_{ac}^2 + I_y^2 + I_x^2} \quad (19)$$

Bu akım ifadesinin her iki tarafı kolektif gerilim etkin değeriyle çarpılarak görünür güç ifadesi,

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P^2 + Q_y^2 + Q_x^2} \quad (20)$$

elde edilmiştir. Bu güç ifadesinde; aktif güç,

$$P = V_{\Sigma} I_{ac} \quad (21)$$

geçici (temporal) reaktif güç,

$$Q_y = V_{\Sigma} I_y \quad (22)$$

ve dolanan (circulating) reaktif güç,

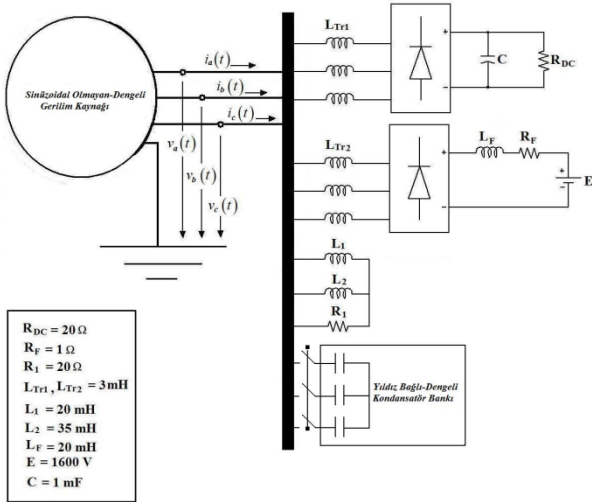
$$Q_x = V_{\Sigma} I_x \quad (23)$$

biçiminde hesap edilmiştir.

Ari ve Stankovich'in tanımladığı güç ifadesinin özelliği iki farklı aktif kompanzasyon stratejisi için bir araç teşkil etmesidir. Bu kompanzasyon stratejilerinden birincisi  $Q_x$  ve  $Q_y$ 'nin kompanze edildiği tam kompanzasyon stratejisidir. İkincisi ise sadece  $Q_x$ 'in kompanze edildiği ve böylece ani gücün korunduğu kompanzasyon stratejisidir.

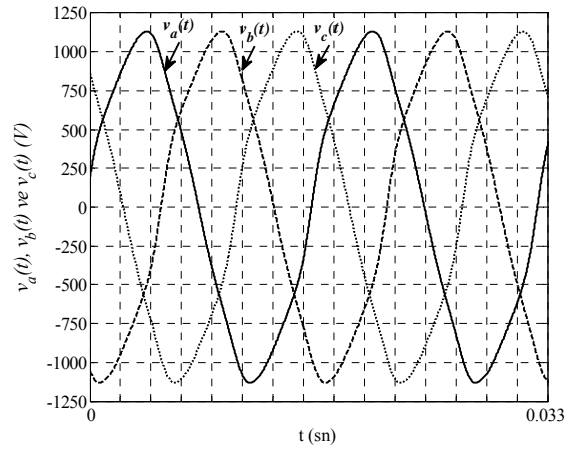
### 3 Analiz

DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait güç ifadelerinin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından analizinin yapılacağı sistem Şekil 1'de verilmiştir.



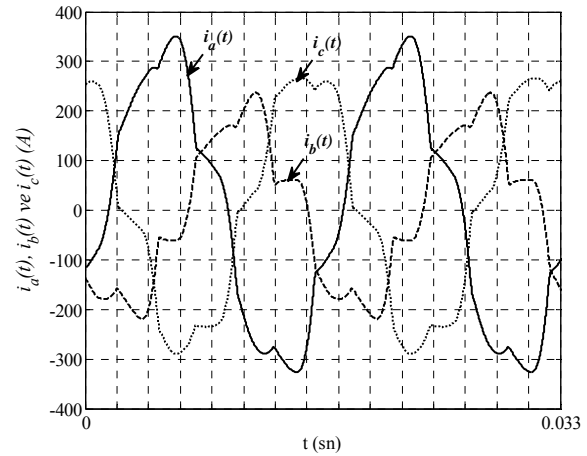
Şekil 1: Analiz sistemi.

Şekil 1'de verilen analiz sistemi üç çeşit yük tipine sahiptir; bunlar, saf direnç besleyen 6 darbeli doğrultucu, d.a. motor besleyen 6 darbeli doğrultucu ve dengersiz indüktif yüklerdir. Analiz sisteminde ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötr arası gerilimleri ile kompanzasyonsuz durumda kaynaktan çekilen faz akımlarına ait dalga şekilleri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2: Ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötr gerilimlerinin dalga şekilleri (temel frekans:60Hz).

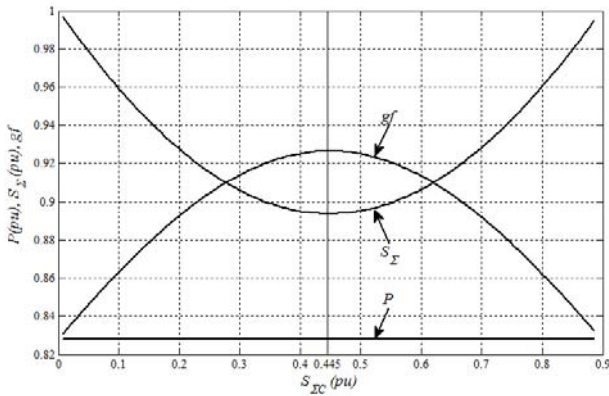
Şekil 2'den faz-nötr gerilimlerinin dengeli fakat bozulmuş dalga şekillerine sahip olduğu görülmektedir. Bu harmonik bozulmanın miktarı ise  $THD$  olarak 5% değerinde ölçülmüştür.



Şekil 3: Sistemin kompanzasyonsuz durumunda faz akımlarının dalga şekilleri (temel frekans:60Hz).

Şekil 3'den kaynaktan çekilen faz akımlarının dengersiz ve bozulmaya uğramış dalga şekillerine sahip olduğu görülmektedir. Dengersizlik miktarları temel harmonik akımı için  $I_1/I_1^+$  (%) olarak 26.35 değerinde ölçülmüştür. Diğer taraftan bozulma miktarları  $THD$  olarak a, b ve c fazları için sırasıyla 14%, 22% ve 16% değerlerinde ölçülmüştür.

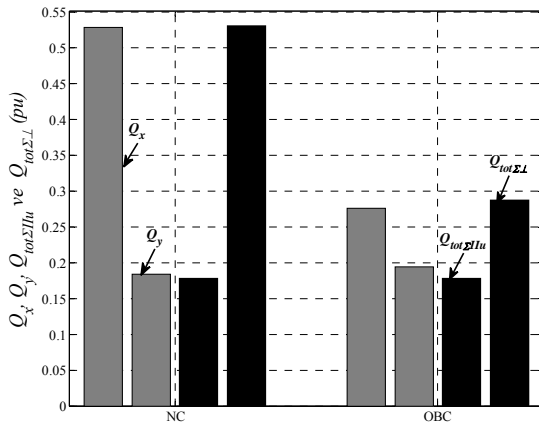
Yıldız bağlı dengeli kondansatör grubunun (5)'de verilen ifadeye göre hesaplanan gücünün ( $S_{\Sigma C}$ ) artışıyla ortak bağlantı noktasında ölçülen güç faktörü ( $gf$ ), aktif ( $P$ ) ve DIN std. 40110 görünür ( $S_{\Sigma}$ ) güçlerinin değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Aynı şekil içinde dikey çizgiyle işaretlenen değer güç faktörünün azami olduğu durumda yıldız bağlı dengeli kompanzasyon kondansatörü grubunun gücüdür.



Şekil 4: Yıldız bağlı dengeli kondansatör grubunun gücünün artışıyla ortak bağlantı noktasında ölçülen güç faktörü, aktif ve görünür güçlerin değişimi.

Şekil 4'den kompanzasyonsuz (NC) durumda ölçülen güç faktörü ( $gf$ ), aktif ( $P$ ) ve görünür ( $S_{\Sigma}$ ) güçlerin sırasıyla 0.82, 0.82pu ve 1pu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, güç faktörünün azami değerine ulaştığı bir başka ifadeyle en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon (OBC) durumunda görünür güç 0.89pu olup kondansatör grubu görünür gücü ( $S_{\Sigma C}$ ) 0.445pu değerindedir.

Kompanzasyonsuz ve en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon yapılmış sistem durumlarında DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait aktif olmayan güç bileşenlerinin ortak bağlantı noktasında ölçülen değerleri Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5: NC ve OBC durumlarında DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'in tanımladığı aktif olmayan güçlere ait ölçülen değerler.

Şekil 5'de verilen sonuçlardan kompanzasyonsuz durum (NC) için DIN std. güç ifadesinin  $Q_{tot\Sigma||u}$  ve  $Q_{tot\Sigma\perp}$  güç bileşenlerinin sırasıyla 0.177pu ve 0.531pu, Ari-Stankovich'in tanımladığı  $Q_x$  ve  $Q_y$  güçlerinin ise sırasıyla 0.529pu ve 0.184pu değerlerinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon durumunda  $Q_{tot\Sigma||u}$  ve  $Q_{tot\Sigma\perp}$  güçleri 0.177pu ve 0.288pu;  $Q_x$  ve  $Q_y$  güçleri ise 0.275pu ve 0.194pu değerlerinde hesap edilmiştir. Böylece, her iki ifadede tanımlanan aktif olmayan güçlerin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyonun gücü olan 0.445pu'ü vermediği görülmüştür.

#### 4 Sonuç

Bu çalışmada literatürde yaygın olarak bilinen görünür güç ifadelerinin sinüzoidal olmayan ve dengesiz üç fazlı sistemlerde kapasitif kompanzasyon bakımından niteliksel ve niceliksel analizleri yapılmıştır. Sonuçlar; en iyi dengeli kapasitif kompanzasyonun sistemde var olan gerilim şartlarında çektiği gücü veren bir güç ifadesinin literatürde bulunmadığını göstermiştir.

#### 5 Kaynaklar

- [1] P. M. Lincoln, Polyphase Power Factor, Trans. AIEE. 39 (1920): 1477-1520.
- [2] M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, Quantitative Comparison of Power Decompositions, EPSR. 78 (3) (2008): 318-329.
- [3] A. E. Emanuel, Apparent Power Definitions for Three-phase Systems, IEEE Trans. on Power Del. 14 (3) (1999): 767-772.
- [4] W. G. Morsi, M. E. El-Hawary, Defining Power Components in Nonsinusoidal Unbalanced Polyphase Systems: The Issues, IEEE Trans. on Power Del. 22 (4) (2007): 2428-2438.
- [5] L.S. Czarnecki, Budeanu and Fryze: Two Frameworks for Interpreting Power Properties of Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents, Electr. Eng. (Archiv fur Elektrotechnik). 80 (6) (1997): 359-367.
- [6] A. E. Emanuel, On the Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits with Sinusoidal Voltage and Currents, IEEE Trans. on Power Del. 8 (3) (1993): 841-852.
- [7] S. Pajic, A. E. Emanuel, Modern Apparent Power Definitions: Theoretical Versus Practical Approach-the General Case, IEEE Trans. on Power Del. 21 (4) (2006): 1787-1792.
- [8] IEEE Standard, Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, IEEE Std. 1459-2000. (2002).
- [9] F. Buchholz, Das Begriffssystem Rechteistung, Wirkleistung, totale Blindleistung, Selbstverlag, Munchen, Germany, 1950.
- [10] German Standard, AC Quantities Part 2: Multi Conductor Circuits, DIN std. 40110. (2002) (in German).
- [11] L.S. Czarnecki, T. Swietlicki, Powers in Nonsinusoidal Networks: Their Interpretation, Analysis and Measurement, IEEE Trans. on Instrum. and Meas. 39 (2) (1990): 340-345.
- [12] H. Lev-Ari, A.M. Stankovich, Hilbert Space Techniques for Modelling and Compensation of Reactive Power in Energy Processing Systems, IEEE Trans. on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications. 50(4) (2003): 540-556.