

ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE DENGESİZ GÜCÜN GERÇEK ZAMANDA HIZLI BİÇİMDE HESAPLANMASI

Mehmet BAYRAK¹

Ömer USTA²

H. Muhammed BIYIKLI¹

¹ Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, bayrak@sakarya.edu.tr

² İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü, usta@elk.itu.edu.tr

Abstract : This paper has introduced a new theory to calculate unbalanced power in three phase three-wire power systems. Under unbalanced conditions the three phase instantaneous power oscillates at twice the power system frequency. The magnitude of these oscillations can be used as a measure of system unbalance. The new method to calculate the unbalanced power is very useful for real-time applications and does not effected on harmonics.

Anahtar Kelimeler : Dengesiz güç, Ani güç, Üç fazlı sistemler

1. GİRİŞ

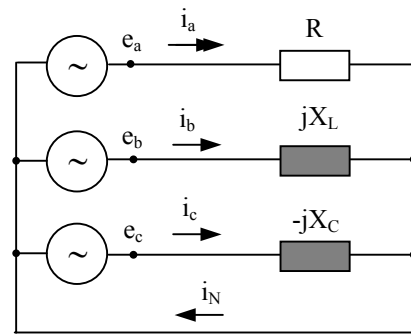
Alternatif akım devreleri için güç ölçümü konusundaki çalışmalar 20. yüzyılın başlarında başlamış ve bu çalışmaların günümüze kadar devam etmesi sonucunda birçok güç tanımı yapılmıştır. Bir fazlı ve dengeli üç fazlı alternatif akım devrelerinde aktif güç, reaktif güç, görünür güç ve güç faktörünün tanımları kesin olmasına rağmen, dengesiz üç fazlı sistemlerde araştırmacılar tarafından ortak bir tanım bulunamamıştır.

Üç fazlı sistemlerde dengesizlik dengesiz arızalar ile dengesiz yüklenmeler sonucu oluşmaktadır. Gerilim dengesizliği enerji kalitesini bozarak, üç fazlı asenkron motorların aşırı ısınmalarına, elektronik kontrol devrelerinin hatalı çalışmalarına ve uygun tasarlanmamış ölçüm cihazlarının yanlış ölçmelerine neden olmaktadır. Bu nedenle, dengesizlik durumunda ölçme hatalarını en aza indirmek için özellikle güç ölçümü konusunda bazı çalışmalar yapılmıştır ve bu çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmaların bazılarında [1,2], ani güçteki sistem frekansının iki katı frekansta salınan sinüsoidal bileşenin dengesizlikten oluşmadığı ve nedeninin henüz bilinmediği kabul edilmektedir.

Bu çalışmada, üç fazlı sistemlerde ani güçteki sistem frekansının iki katı frekanstaki salınımların nedenini açıklamak için ani güç bağıntısı çıkarılmış, bu bağıntıdan elde edilen dengesiz güç tanımı örnek bir sistem üzerinde başka araştırmacılar tarafından verilen bağıntılarla karşılaştırılmıştır.

2. DENGESİZ ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE GÜÇ

Dengesiz üç fazlı sistemlerde gücün hesaplanması için yapılan çalışmaların amaçlarından biri elektrik enerjisinin doğru olarak fiyatlandırılması ve enerji kaynaklarının kullanım oranlarının bulunması içindir. Bu çalışmaların sonucunda iki farklı görünür güç ile güç faktörü tanımı ortaya çıkmıştır [3,4]. Bu tanımlar arasındaki farkın iyi anlaşılabilmesi için aşağıda verilen örnek devre ele alınmıştır.



Şekil 1. Örnek sistem

Güç faktörü tanımlarından birincisi toplam aktif gücün aritmetik görünür güce oranı olup,

$$PF = \frac{P_a + P_b + P_c}{S_a + S_b + S_c} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada P aktif gücü, S görünür gücü göstermektedir. İkinci tanıma göre güç

faktörü, toplam aktif gücün geometrik görünür güce oranı olup,

$$PF = \frac{P_a + P_b + P_c}{|P_a + P_b + P_c + j(Q_a + Q_b + Q_c)|} \quad (2)$$

biçimindedir.

Direnç, bobin ve kondansatörün empedans değerleri birbirine eşit olduğunda, (1) nolu tanıma göre güç faktörü 0.707, (2) nolu tanıma göre güç faktörü 1 olmaktadır. (2) Nolu tanıma göre devre saf ohmik gibi görünmektedir. Fakat gerçekte kaynaktan çekilen toplam reaktif gücün sıfır olmasına rağmen, reaktif güç fazlar arasında dolaşmaktadır. Fazlar arasında dolaşan ve hatlardan aşırı akım akmasına neden olan bu güç dengesiz güç olarak tanımlanmaktadır. Enerji iletim hatlarında güç iletimini azaltan dengesiz güç,

$$D = \sqrt{S_e^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (3)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır [1]. Burada P toplam aktif gücü, Q toplam reaktif gücü göstermektedir.

S_e ise

$$S_e = V_e I_e \quad (4)$$

Bağıntısıyla hesaplanır. Burada,

$$V_e = \sqrt{\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{3}} ; I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}$$

dir. Bu bağıntılardan da görüldüğü gibi dengesiz gücü hesaplamak için üç fazlı toplam aktif ve reaktif güçlerin, herbir fazın gerilim ve akımlarının etkin değerlerinin ve üç fazlı eşdeğer gerilim ve akım ile görünür gücün hesaplanması gerekir. Sonuç olarak, dengesiz gücü hesaplamak için çok fazla işlem yapmak gerekir. Ayrıca, akım ve gerilimin harmonik içermesi durumunda dengesiz gücü bu bağıntılarla hesaplamak oldukça zorlaşır.

3. ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE GÜÇ

Bir fazlı sistemlerde ani güç gerilim ve akımın ani değerlerinin çarpımına eşittir.

$$p = v \cdot i \quad (5)$$

Gerilim ve akımın ani değerleri

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (6a)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \phi) \quad (6b)$$

olduğu varsayıldığında ani güç ifadesi,

$$\begin{aligned} p &= 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \phi) \\ &= VI \cos \phi - VI \cos(2\omega t - \phi) \\ &= P - P \cos(2\omega t) - Q \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (7)$$

biçiminde olur. Burada

$$P = VI \cos \phi \quad (8a)$$

$$Q = VI \sin \phi \quad (8b)$$

dir. Bu eşitliklerden de görüldüğü gibi bir fazlı sistemlerde ani güç, aktif güç olarak tanımlanan ortalama güç (P) ile yüke bağlı olarak şebeke frekansının iki katı frekansta farklı genlikte salınım yapan gücün toplamına eşittir.

Üç fazlı sistemlerde ani güç herbir faza ait gerilim ve akımın ani değerlerinin çarpımlarının toplamına eşittir.

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (9)$$

4. DENGESİZ ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE GÜÇ

Üç fazlı alternatif akım devrelerinde dengesizlik, herbir fazın gerilimlerinin genliklerinin birbirine eşit olmaması veya aralarındaki faz açısının 120° 'den farklı olmasından ve/veya dengesiz yüklerden dolayı faz akımlarının farklı genlikte olması ve gerilime benzer biçimde faz açılarının 120° 'den farklı olması sonucu oluşmaktadır. Senkron generatörler ile bunlara bağlı olan yüklerin sözkonusu olduğu sistemlerde dengesizlik, ya generatörlerdeki iç arızalar sonucunda faz gerilimlerinin genliklerinin birbirinden farklı olması ya da dengesiz yüklerden veya simetrik olmayan arızalar sonucunda faz akımlarının birbirine eşit olmaması ve aralarındaki faz açısının 120° olmaması gibi nedenlerle ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle dengesizliğe yol açan etkenlerin bunlardan biri veya birkaçı olabilir.

Herbir faza ilişkin gerilim ve akımın ani değerlerinin;

$$v_a = \sqrt{2}V_a \sin(\omega t)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_b \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$i_a = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_b \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_c \sin(\omega t + 120^\circ)$$

olduğu düşünülürse, üç fazlı üç telli sisteme ilişkin ani güç bağıntısı

$$\begin{aligned}
p &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\
&= 2V_a I_a \sin(\omega t) \sin(\omega t - \phi_a) \\
&\quad + 2V_b I_b \sin(\omega t - 120) \sin(\omega t - 120 - \phi_b) \\
&\quad + 2V_c I_c \sin(\omega t + 120) \sin(\omega t + 120 - \phi_c)
\end{aligned} \quad (10)$$

biçiminde yazılabilir. Aktif ve reaktif güç için

$$\begin{aligned}
P_a &= V_a I_a \cos \phi_a & Q_a &= V_a I_a \sin \phi_a \\
P_b &= V_b I_b \cos \phi_b & Q_b &= V_b I_b \sin \phi_b \\
P_c &= V_c I_c \cos \phi_c & Q_c &= V_c I_c \sin \phi_c
\end{aligned} \quad (14)$$

yazılırsa üç fazlı ani güç

$$\begin{aligned}
p &= P_a + P_b + P_c - P_a \cos(2\omega t) - P_b \cos(2\omega t + 120^\circ) \\
&\quad - P_c \cos(2\omega t - 120^\circ) - Q_a \sin(2\omega t) \\
&\quad - Q_b \sin(2\omega t + 120^\circ) - Q_c \sin(2\omega t - 120^\circ) \\
&= P_a + P_b + P_c - (P_a - 0.5P_b - 0.5P_c + 0.866 Q_b \\
&\quad - 0.8666Q_c) \cos(2\omega t) - (Q_a - 0.5Q_b - 0.5Q_c \\
&\quad - 0.866 P_b + 0.866P_c) \sin(2\omega t)
\end{aligned} \quad (15)$$

şeklini alır [5].

Bu bağıntıdan da görüldüğü gibi, kaynak gerilimi ve yüklerin simetrik olması durumunda, parantez içindeki aktif ve reaktif güçlerin belirli katsayılar ile çarpımının toplamı olan katsayı sıfır olur. Dolayısıyla ani güçte $\cos(2\omega t)$ 'li veya $\sin(2\omega t)$ 'li terimler görülmez. Bu durumda,

$$p = P_a + P_b + P_c = P \quad (16)$$

yazılabilir. Kaynağa ait faz gerilimlerinin birbirinden farklı veya yükün dengesiz olması durumunda P_a , P_b , P_c veya Q_a , Q_b , Q_c birbirinden farklı olur. Bu durumda ise $\cos(2\omega t)$ 'li terimlerin toplamı ve $\sin(2\omega t)$ 'li terimlerin toplamı sıfırdan farklı olur. Bu durumda, ani güç P ortalama gücü ile P_{2m} genlikli sinüsoidal salınımların toplamından oluşur. Aktif ve reaktif güçlerdeki dengesizlik ani güçte şebeke frekansının iki katı frekansta salınım oluşturmaktadır ve bu salınımların genliği dengesiz gücü vermektedir ve ayrıklı Fourier dönüşümü kullanılarak

$$P_{2m} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N p(n) e^{-\frac{j4\pi n k}{N}} \quad (17)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada, n örnekleme anını, N bir periyottaki örnek sayısını göstermektedir. $p(n)$ n . andaki ani gücü belirtmektedir ve

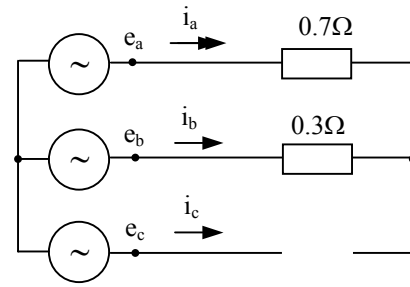
$$p(n) = v_a(n) i_a(n) + v_b(n) i_b(n) + v_c(n) i_c(n) \quad (18)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

Gerilim ve akımın harmonik içermesi durumunda, ani güçte şebeke frekansının üç katı veya daha yüksek frekanslı salınımlar oluşacağından, elde edilen bu bağıntılar kullanılarak hesaplanan dengesiz güç harmoniklerden etkilenmemektedir.

5. SAYISAL UYGULAMA

Neden kaynaklandığı tartışma konusu olan üç fazlı ani güçteki şebeke frekansının iki katı frekanstaki salınımların dengesizlikten oluştuğu bir önceki bölümde matematiksel eşitliklerle ispatlanmıştır. Bunu daha iyi açıklamak için bazı araştırmacıların örnek olarak gösterdiği [1] aşağıdaki şekildeki dengesiz üç fazlı üç iletkenli devreyi ele alalım.



Şekil 2. Dengesiz üç fazlı devre

Kaynak gerilimlerinin etkin değerinin 100 V olması durumunda (3) nolu bağıntıya göre dengesiz güç,

$$V_c = \sqrt{\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{3}} = \sqrt{\frac{100^2 + 100^2 + 100^2}{3}} = 100 \text{ V}$$

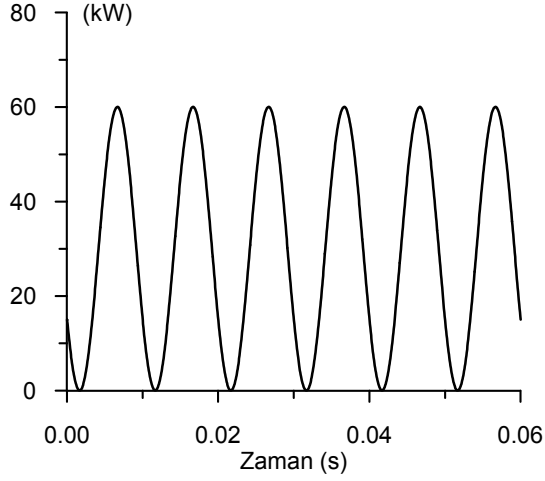
$$I_c = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} = \sqrt{\frac{173,2^2 + 173,2^2 + 0}{3}} = 141,42 \text{ A}$$

$$S = 3V_c I_c = 3 \cdot 100 \cdot 141,42 = 42,4 \text{ kVA}$$

$$S_u = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} = \sqrt{42,4^2 - (30^2 + 0)} = 30 \text{ kVA}$$

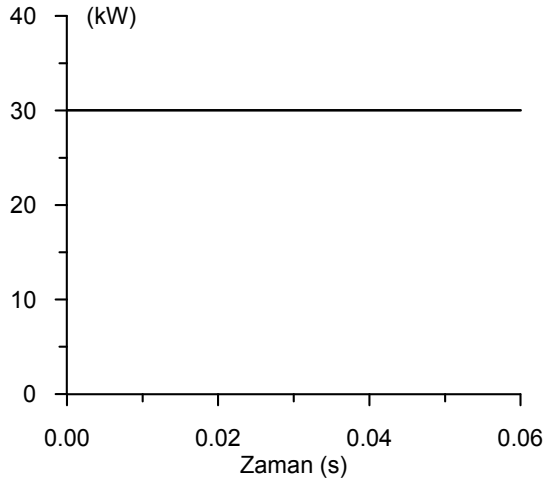
olarak hesaplanır.

Aynı devrenin PSpice programı yardımı ile simülasyonu yapıldığında kaynak çıkışındaki ani güç aşağıdaki şekildeki gibi olur.



Şekil 3. Kaynaktan çekilen ani güç

İncelenen devrede harmonik kaynağı olmadığından, bir periyot için 12 örnek yeterli olur. (17) nolu bağıntı kullanılarak ani güçteki 100 Hz'lik salınımlar hesaplandığında aşağıdaki şekil elde edilir.



Şekil 4. Ani güçteki 100 Hz'lik salınımların genliği

Yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi, ani güçteki 100 Hz'lik salınımların genliği (3) nolu bağıntıyla hesaplanan dengesiz güce eşittir.

6. SONUÇ

Matematiksel eşitliklerden ve örnek sistemin bilgisayar simülasyonu ile elde edilen sayısal veriler kullanılarak yapılan hesaplamalardan görüldüğü gibi, üç fazlı ani güçte sistem frekansının iki katı frekanstaki salınımlar tamamen dengesizlikten kaynaklanmaktadır ve bu salınımların genliği dengesiz güce eşittir. Böylece, bazı araştırmacıların ani güçteki salınımların neden kaynaklandığı konusunda yaptığı tartışmalar sona erdirilmiştir.

Yeni bulunan yöntemle hesaplanan dengesiz güç harmoniklerden etkilenmemektedir. Çok az matematiksel işlem gerektiren bu yöntem, gerçek zamanda hızlı hesaplamalar için uygun olup, dengesizliği düzelten güç devrelerinde kolaylıkla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] L.Z., Czarniecki, 'Power related phenomena in three-phase unbalanced systems', IEEE Trans. On Power Delivery, vol.10, no.3, 1995.
- [2] L.Z., Czarniecki, 'Minimisation of unbalanced and reactive currents in three-phase asymmetrical circuits with nonsinusoidal voltage', IEE Proceedings-B, vol.139, no.4, 1992.
- [3] A.E. Emanuel, 'Apparent and reactive powers in three-phase systems: In search of a physical meaning and a better resolution', ETEP, vol.3, no.1, 1993.
- [4] 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 Delivery, vol.8, no.3, 1993.
- [5] Ö. Usta, M. Bayrak and M.A. Redfern, 'A new digital relay for generator protection against asymmetrical faults', IEEE Trans. On Power Delivery, vol.17, no.1, 2002.