

SENKRON MAKİNEDE GÜÇ AKIŞ DİYAGRAMI, GÜÇ ve MOMENT ÇEŞİTLERİ

ilhami* çetin

ÖZET

UDK: 621.313.32

Yazıda senkron makinelerin generatör ve motor olarak çalışma durumlarında güç akış ve moment diyagramları incelenmiştir. Ayrıca momentlerin büyüklüğünün hesaplanması ve işaretlerinin saptanması gösterilmiştir.

SUMMARY

The power flow and moment diagrams of a synchronous machine operating as a motor and as an alternator are investigated. Also, the method of calculating the magnitude and finding the sign of the moment is illustrated.

1. ETKİN GÜÇ DAĞILIM ve AKIŞI

Elektrik makinelerinde güç dağılım ve akışları belirli bir düşünme şekli ile incelenir. Bu yöntem, güçlerin, sıvı akışına benzer biçimde, büyüklük ve akış yönleri ile kanallarda gösterilmesine dayanır. Kanal genişliği gücün büyüklüğünü, oklar akış yönlerini gösterir. Girişteki etkin güç çeşitli kayıplara uğradıktan sonra, faydalı çıkış gücü olarak makineyi terkeder. P ile gösterilen etkin güçler çalışma şekline göre akış yönünü değiştirebilir ve akış yönüne göre pozitif yada negatif olabilir. V ile gösterilen kayıp güçlerin akış yönü değişmez, daima pozitif kalır. Şekilde senkron makinenin generatör ve motor çalışma durumlarındaki güç akış ve dağılım diyagramları gösterilmiştir. Transformator ve asenkron makinelerde kullanılan semboller (semboller) burada aynen korunmuştur. Diyagramlarda ayrı bir kaynaktan karşılanan uyarma devresi kayıpları kapsam dışı bırakılmıştır.

Senkron generatör tahrik motorunun P_{jm} mil mekanik gücünü alır (Şekil a). Sürtünme ve havalandırmanın yol açtığı V_m mekanik kayıp gücü çıktıktan sonra kalan, P_{2m} iç mekanik gücü tamamen elektrik gücüne dönüşerek hava aralığından statora geçer. Statorun aldığı bu etkin güce stator kayıplarını kapsamadığı için 'iç güç' P^i , hava aralığından

geçtiği için 'hava aralığı gücü' P^h , döner alan tarafından iletildiği için 'döner alan gücü' P^d yada elektromagnetik dönüşümle elde edildiği için 'elektromagnetik güç' P_e denir. Diğer elektrik makinelerine ve transformatörlere uyması bakımından buna 'iç güç' demek daha doğru olacaktır.

$$P_{2m} = P^h + P^d = P^i + P^e = P^d + P^e$$

Senkron generatörde iç mekanik gücün iç güce eşitliği ilginçtir. İç güçten V_1 stator kayıp gücü çıktıktan sonra geri kalan P^h birincil (primer) etkin güç, şebekeye verilen yararlı güçtür. V_j birincil kayıp gücü birincil sargıların R_1 faz dirençlerinin V^2/R_1 bakır, magnetik devrenin V_j^2/P_m demir ile V_1 ek kayıplarından oluşur ve iç güç tarafından karşılanır.

$$P_1 = P^i - V_1$$

$$V_1 = V_{1Cu} + V_{1Fe} + V_{1z}$$

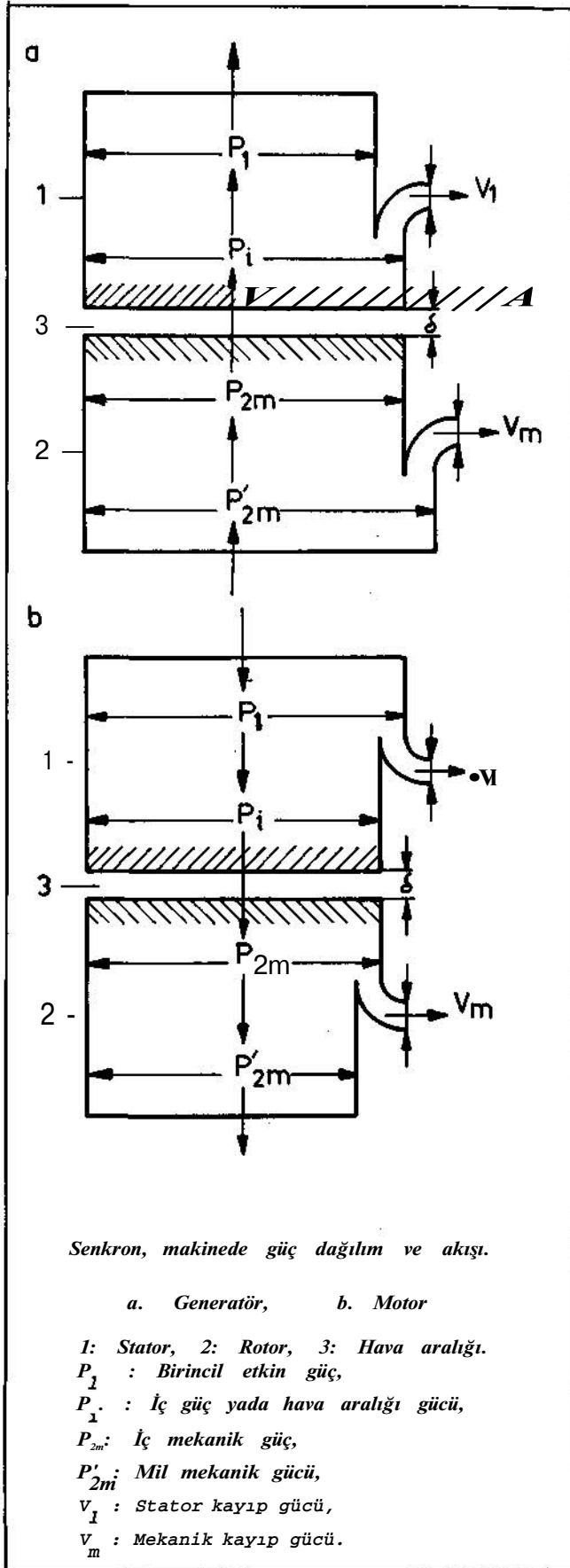
$$m_1 = 1 \quad P_1 = U_1 I_1 \cos \phi_1$$

$$V_{1Cu} = V_1^2 / R_1$$

$$m_1 = 3 \quad P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \phi_1$$

$$V_{1Fe} = \frac{TR}{V} T^2$$

Ilhami Çetin, Doç.Dr., İTÜ Elk.Fak.



V_1 faz gerilimi ve I_j faz akımı yerine U_{1h} hatlar arası gerilim ve I_j^{\wedge} hat akımı kullanılırsa, güç formülünde 3 yerine $\sqrt{3}$ alınır.

$$P_1 = \sqrt{3} U_{1h} I_j$$

Senkron motor ise şebekeden yukardaki bağıntıdan hesaplanan P^{\wedge} birincil etkin gücünü çeker (Şekil b V_1 birincil kayıp gücü çıktıktan sonra kalan iç güç hava aralığından rotora geçerek, tamamen mekanik güce dönüşür. İç güç senkron motorda rotorun aldığı güçtür ve doğrudan iç mekanik güce eşittir. İç güç yerine burada da hava aralığı gücü, döner alar, gücü yada elektromagnetik güç denilebilir.

$$P_i = P_1 - V_1 = P_{2m}$$

$$V_1 = V_{1Cu} + V_{1Fe} + V_{1z}$$

İç gücün dönüşümü ile elde edilen iç mekanik güçten sürtünme ve havalandırmanın yol açtığı V_m mekanik kayıp gücü çıktıktan sonra kalan P_{2m}^{\wedge} mekanik gücü yada yararlı çıkış gücüdür.

$$P_{2m}^{\wedge} = P_{2m} - V_m$$

Özetle birincil etkin güç generatörün şebekeye verdiği yada motorun şebekeden aldığı etkin elektrik gücüdür. P_{2m}^{\wedge} mil mekanik gücü generatörün tahrik motorundan aldığı yada motorun iş makinesinin mili ne verdiği mekanik güçtür. Oluşan kayıplar nedeniyle güçler akış yönünde azalır. Çıkış gücü giriş gücünden daima küçüktür. Çıkış gücünün giriş gücüne oranı makinenin verimidir. Bu verime uyarma kayıpları dahil değildir.

İç güç bakımından senkron makinenin doğası asenkron makineninkinden farklıdır. Uyarma akımının DA (doğru akım) olarak ayrı bir kaynaktan karşılandığı senkron makinede iç güç ayrışımı yoktur ve iç güç daima iç mekanik güce eşittir. Diğer bir deyişle elektromagnetik enerji dönüşümünün etkinliğini saptayan iç verim generatörde ve motorda 1'e eşittir.

Ayrı bir kaynaktan karşılanan uyarma devresi kayıpları güç diyagramına sokulmaz. Generatörden motora geçildiğinde kayıp güçleri yönlerini korur, diğer bütün etkin güçler yön değiştirir. Senkron makinenin yük açısı pozitif iken generatör, negatif iken motor olduğunu biliyoruz. 0 halde güç akış yönlerini yük açısı saptamaktadır.

Faz giderici olarak çalışmada etkin güç, sıfır mil mekanik gücü ile boşa çalışma olduğundan, güç akış ve dağılım diyagramı ayrıca çizilmemiştir.

2. GÜÇ ÇEŞİTLERİ

Güç akış ve dağılım diyagramı yardımı ile çeşitli etkin güçleri tanımladık. Birincil etkin güç, iç güç, iç mekanik güç, mil mekanik gücü ve kayıp güçleri. Şimdi de görünür, etkin ve tepkin güçleri görelim.

Alternatif akımlı şebekenin iki noktası arasında görünür, etkin ve tepkin gücün varlığını biliyoruz. Buna göre görünür birincil güç S_1 , etkin birincil güç yada kısaca birincil güç P_1 , tepkin birincil güç Q_1 , görünür iç güç S_i , etkin iç güç yada kısaca iç güç P_i , tepkin iç güç Q_i gösterilebilir.

Güç dağılımı ve akış diyagramı eşdeğer şemanın güç bakımından değerlendirilmesidir. Bilindiği gibi kayıp güçler ancak dirençlerde oluşabilir, reaktanslarda hiçbir zaman etkin güç tüketilmez. Her güç diyagramı alınan eşdeğer şemaya bağlıdır. Senkron makinenin eşdeğer şemasından gidildiğinde çeşitli güçlerin hem generatör ve hem de motor çalışması için geçerli ifadeleri kolayca bulunabilir.

$$S_1 = 3U_1 I_1$$

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \phi_1 = S_1 \cos \phi_1$$

$$Q_1 = 3U_1 I_1 \sin \phi_1 = S_1 \sin \phi_1$$

$$S_i = 3E_p I_a$$

$$P_i = 3E_p I_a \cos \theta_1 = S_i \cos \theta_1$$

$$Q_i = 3E_p I_a \sin \theta_1 = S_i \sin \theta_1$$

Eşdeğer şemaya göre faz başına etkin iç güç, kutup tekerleği gerilimi E_p ve endüi akımı I_a ile aralarındaki Q_i faz açısı kosinüsünün çarpımına eşittir. Tepkin iç güçte bu faz açısının sinüsü alınır. Bu formüller asenkron makine ve transformatörlere de uygulanabilir.

Bir senkron makinenin etiket yada katalogunda belirtilen gücün gördüğümüz çeşitli güçlerden hangisi olduğunu iyi bilmek gerekir. Güç etiketinde ve kataloglarda senkron generatör için birincil görünür güç ve güç katsayısı, senkron motor için ise mil mekanik gücü verilir. Elektrik motorları için daima bu gücün verilme nedeni kullanıcıyı öncelikli olarak ilgilendirmesidir.

Sarmaşık güç kullanılırsa, bu gücün modülü görünür güce, gerçek kısmı etkin güce ve sanal kısmı tepkin güce eşit olur.

$$\underline{S} = P + jQ$$

$$S = |\underline{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$P = \text{Re} \underline{S}$$

$$Q = \text{Im} \underline{S}$$

Enerjinin korunumu ilkesi etkin, tepkin ve karmaşık güçler için ayrı ayrı geçerlidir. Buna dayanarak iç güçler için biri birincil güce, diğeri enklenen gerilime göre olmak üzere, ikişer formül yazılabilir. Her gruptaki iki formül eşdeğer olup, aynı sonucu verir. Aralarındaki fark, değişkenlerin değişik olmasıdır.

$$P_1 = P_1 + 3R_1 I_1^2 = 3V_1 \cos \theta_1$$

$$Q_1 = Q_1 + 3X_s I_1^2 = 3V_1 \sin \theta_1$$

$$S_1 = -S_1 + 3Z_1 I_1^2 = 3E_p I_a$$

Tepkin güç akışı senkron generatör ve motor için niteleyici değildir, yani hem senkron generatör ve hem de senkron motor şebekeden tepkin güç alabilir yada şebekeye tepkin güç verebilir. Etkin ve tepkin gücün akış yönünü ϕ faz açısı saptar. Bu açı -90° ile 90° arasında ise senkron makine etkin güç verir, bu bölgenin dışında etkin güç alır. Faz açısı pozitif ise senkron makine tepkin güç verir, negatif ise tepkin güç alır. Bu sonuçlar kullanılan üreteç yön sistemi için geçerlidir.

3. İÇ MOMENTİN HESAPLANMASI VE İÇ GÜÇ İLE SENKRON MOMENT BAĞINTISI

Elektrik makinelerinde oluşan iç döndürme momenti yada diğeri adı ile elektromagnetik döndürme momenti başlıca üç yöntemle hesaplanabilir:

1. Makinenin güç dağılımından bulunan ve iç mekanik güce uygulanan güç moment temel bağıntısı,
2. Bir iletkenine uygulanan magnetik kuvveti veren Biot-Savart yasası: $F = B.L.i$,
3. Magnetik enerji değişiminde oluşan kuvvet yada momentin formülü.

Bu yöntemlerden mekanikte görülen güç ve moment bağıntısı genellikle sonucu en kolay şekilde verdiğinden, tercihan uygulanacaktır. Asenkron makine de elektromagnetik momenti bulmak için iç mekanik güçten gidilebilir. Burada iç mekanik gücün daima hava aralığı gücüne eşit olması asenkron makineye göre incelemeyi kolaylaştırır.

Rotoru ω sabit senkron hızı ile dönen bir senkron makine için mekanik gücün hava aralığı gücüne eşitliğinden gidilerek M iç yada elektromagnetik moment ile P_j iç güç arasındaki genel bağıntı yazılabilir. Senkron hız (ω) akım açısız hızı (ω_n) çift kutup sayısına (p) bölümüne eşittir.

$$P_i = P_m = \omega M_i = \frac{\omega}{p} M_i$$

$$M_i = \frac{1}{\omega} P_i = \frac{1}{\omega} P_i$$

$$\omega = 2\pi n_s = \omega/p$$

$$\omega = 2\pi f$$

tç döndürme momenti ve iç güç arasındaki bu genel bağıntı senkron ve asenkron makinede aynıdır, tç güç ve iç moment daima birbirine orantılıdır. İç moment kutup sayısı ile doğru, şebeke frekansı ile ters orantılı değişir. Asenkron makineden senkron makineye geçişte rotor elektrik gücü sıfır ve bu nedenle rotor iç mekanik gücü hava aralığı gücüne eşit olmaktadır. Böylece rotor elektrik gücü ile iç moment bağıntısı kalkmakta, iç mekanik güç ile iç moment bağıntısı hava aralığı gücü ile iç moment bağıntısına özdeş olmaktadır.

Etki tepki ilkesinin bir sonucu olarak her elektrik makinesinde olduğu gibi, iç moment rotor ve statora eşit şiddette, fakat karşıt yönlerde uygulanır. Statora uygulanan moment temele iletilir. Bu nedenle statorun temele tespit edilmesi ve temelin yeterli sağlamlıkta yapılması zorunludur.

Aynı bir elektrik motorunda rotor sabit, stator hareketli yapılırsa, stator rotora karşıt yönde döner.

Döner alanın asenkron makinede kendi endüklediği rotor alternatif akımı ile oluşturduğu momente "asenكرون moment" denmesi gibi, senkron makinede bir dış kaynaktan sağlanan rotor doğru akımı ile oluşturduğu momente "senkron moment" denir. Dengeli çalışmada çok fazlı bir senkron makinenin ani gücü sabit olduğundan, senkron moment de sabittir, yani yalnız ortalama değerinden ibarettir. Dengesiz çalışan üç fazlı yada tek fazlı bir senkron makinede ise ortalama senkron moment sabit, fakat ani senkron moment değişkendir.

Aynı bir senkron makinede döner alan, söndürme kafesi (amortisör) yada onun yerine geçen kütleli kutuplar ile bir asenkron moment, uyarma sargısı ile bir senkron moment oluşturabilir. Bu olanaktan senkron motorlara yol vermede yararlanılır. Senkron motor asenkron moment ile asenkron motor olarak yol alır, senkron hıza yaklaşıncaya uyarma akımı verilerek, senkron momentin oluşması ve senkron motora geçiş sağlanır.

4. MEKANİK GÜÇLERE GÖRE MOMENT ÇEŞİTLERİ

Senkron makinedeki tepkin güçler döndürme momenti ile bağlantılı olmadığı halde, etkin güçler döndürme momenti ile bağlantılıdır, örneğin senkron generatörden çekilen F_i gücü artarsa, bu artışı karşılamak için mil momenti derhal artar. Güç akışı ve dağılım diyagramında birbirinden ayırt edilen her bir mekanik güç ile ayrı bir moment hesaplanabilir. Bu momentlerin birbiri ile karıştırılmamasına özellikle dikkat edilmelidir. Mekanik gücün dağılımından gidilerek elektrik makinelerinde genellikle üç moment tanımlanır. İç moment, mil momenti, kayıp momenti. İç momentin (M^i) mekanik iç güçten yada senkron makinede ona eşit olan hava aralığı gücünden hesaplandığını gördük. Mil momenti (M) mil mekanik gücü (P_{j_m}) ile, kayıp momenti (M_v) ise mekanik kayıp gücü (V_m) ile tanımlanır ve hesaplanır. Hepsinde rotor açısal hızının (ω) kullanıldığı bu üç momentin bağıntıları şöyledir:

$$M^i = P_{j_m} / \omega$$

$$M = P_{j_m} / \omega$$

$$\ll V = V \gg$$

Bütün bu momentler hem generatörde ve hem de motorda vardır, fakat bazılarının yönleri rotor dönme yönüne göre değişiktir. Mil momenti generatörde iç moment ile kayıp momentinin toplamına, motorda ise iç moment ile kayıp momentinin farkına eşittir.

Generatör:

$$P_{j_m} = P_i + V_m$$

$$M = M_i + M_v$$

Motor:

$$P_{j_m} = P_i - V_m$$

$$M = M_i - M_v$$

Generatör ve motor diyagramlarında herhangi birinin yönü pozitif kabul edilirse, ona karşılık diğer güç ve moment bağıntıları her iki çalışma şekli için cebirsel yönden geçerli olur.

Bütün elektrik motorlarında olduğu gibi, senkron motorun güç etiketinde ve katalogunda belirtilen etkin güç daima mildeki mekanik güç (P_{2_m}) tür. Çıkış gücü olduğu için P_2 simgesi ile de gösterilir. Elektrik motorlarının güç etiketinde ana mil momenti belirtilmez, çünkü temel formül $M = P/\omega$ uygulanarak verilen ana değerleri ile kolayca hesaplanabilir. Bu hesaplama elektroteknik ile ilgili değildir ve herhangi bir motorda, örneğin benzin yada dizel motorunda aynı şekilde yapılır. Artık bu çeşit motorların güçleri de elektrik güç birimleri W , kW ile ölçülmektedir. Pratikte bu çeşit motorlar için kullanılan güç birimleri $kg.m$ yada $kp.m$, beygir gücü $B.G. = P.S. = 736 W$, $H.P. = 746 W$, moment birimi $kg.m$ yada $kp.m$, kuvvet birimi kg yada kp terkedilmekte ve hatta yasaklanmaktadır. Onların yerine Uluslararası Birim Sistemi'nin (SI) güç için W , moment için Nm , kuvvet için N birimleri kullanılmalıdır.

5. MOMENTİN İŞARETİ ve DEĞİŞMESİ

Şebekeye elektrik gücü veren senkron generatörde mil momenti tahrik motoru momentine ve dönme yönüne karşı olup, bir direnç momenti yada bir frenleyici momenttir. Şebekeden elektrik gücü alan senkron motorda ise moment dönme yönündedir ve motoru hareketini sağlar. İş makinesinin direnç momentine karşıdır. $M = P/\omega$ bağıntısına göre moment ve güç aynı işarettedir. 0 halde senkron generatör moment pozitif, senkron motor moment negatif olacaktır. Bu sonuç kullanılan üreteç yön sistemi için geçerlidir. Asenkron makinede genellikle tercih edilen tüketici yön sisteminde generatör moment negatif, motor moment pozitif alınır.

Şebekeye bağlı bir senkron makine generatör çalışmadan motor çalışmaya yada tersine geçebilir. Böyle bir değişimde makine aynı yönde dönmeye devam eder, fakat moment yönü ve onunla birlikte birincil etkin gücün işareti değişir. Senkron makinenin temel niteliklerinden biri generatör yada motor olmasının yalnız dışardan verilen mekanik güç, diğer bir deyişle dışardan miline uygulanan döndürme momentinin yönü tarafından belirlenmesidir. Uygulanan moment dönme yönünde ise generatör çalışma, dönme yönüne karşı ise motor çalışma elde edilir. İç güç ve iç momentin işaretini yük açısı saptar.

Uyarma akımı değiştirilerek senkron makinenin generatör yada motor olması değiştirilemez. Doğru akım makinesinde ise uyarma akımı ile böyle bir değişiklik yapılabilir. Senkron makinede uyarma akımı tepkin gücün işaretini ve büyüklüğünü saptar. Uyarma akımı değiştirilerek senkron makinenin tepkin güç üreticisi yada tüketicisi olması sağlanabilir.