

BÖLÜM 5 – SENKRON JENERATÖRLER

- 1. Senkron Generatörün Yapısı**
- 2. Bir Senkron Generatörün Hızı**
- 3. Bir Senkron Generatörde İndüklenen Gerilim**
- 4. Senkron Jeneratörlerin Eşdeğer Devresi**
- 5. Senkron Jeneratörün Fazör Diyagramı**
- 6. Senkron Jeneratörlerde Güç ve Moment**
- 7. Senkron Jeneratör Modeline İlişkin Parametrelerin Ölçülmesi**
 - Açık devre testi;
 - Kısa devre testi
 - Kısa devre oranı
- 8. Senkron Jeneratörün Yalnız Çalışması**
 - Yük değişiminin Yalnız Çalışan Bir Senkron Jeneratör Üzerindeki Etkileri
- 9. AA Jeneratörlerin Paralel Olarak Bağlanması**
 - Paralel Çalışma Şartları
 - Senkron Jeneratörün Frekans-Aktif Güç, Gerilim-Reaktif Güç Karakteristikleri
 - Jeneratörlerin Büyük Güçlü Bir Sisteme Paralel Bağlı Olarak Çalışması

AMAÇLAR

- Senkron jeneratörün eşdeğer devresini anlamak
- Senkron jeneratörün fazör diyagramlarını anlamak
- Senkron jeneratörün güç ve moment eşitliklerini bilmek
- Ölçümler yaparak (ADK ve KDK) Senkron jeneratörün karakteristiklerini çıkartmayı öğrenmek
- Senkron jeneratör yalnız başına çalışırken yük değişiminde uç gerilimin nasıl değiştiğini anlamak. Değişik yük koullarında uç gerilimini hesaplamak
- İki veya daha fazla Senkron jeneratörün paralel çalışma şartlarını anlamak
- Senkron jeneratörleri paralel olarak çalıştırma adımlarını anlamak
- Çok büyük güç sistemlerinde (veya sonsuz güçlü baraya bağlı iken) Senkron jeneratörlerin paralel olarak çalışmasını anlamak
- Senkron jeneratörlerinin statik kararlılık sınırlarını anlamak ve geçici kararlılık sınırının neden statik kararlılık sınırından daha düşük olduğunu anlamak
- Hata (kısa devre) şartlarında akan geçici akımları anlamak
- Senkron jeneratörlerinin nominal büyüklüklerini anlamak ve hangi şartlarda bu değerlerin sınırlandırıldığını anlamak

Senkron jeneratörler veya alternatörler mekanik gücü alternatif akım elektrik gücüne dönüştürmek için kullanılan senkron makinelerdir.

1. Senkron Generatörün Yapısı

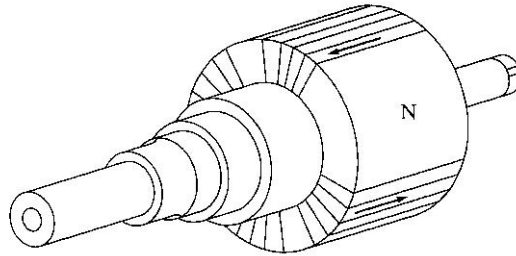
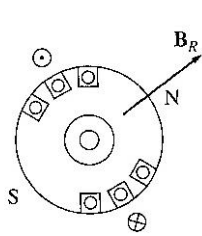
Senkron Generatörler veya Alternatörler, mekanik gücü AA elektrik gücüne dönüştürmek için kullanılan senkron makinelerdir.

Bir senkron generatörde, rotor sargısına DA akım uygulanır. Bu akım bir rotor manyetik alanı oluşturur. Sonra generatörün rotoru, bir hareket kaynağı ile döndürülür. Böylece makinede içinde dönen bir manyetik alan üretilmiş olur. Bu dönen manyetik alan generatörün stator sargılarında üç fazlı gerilimler indükler.

Genelde makinede sargıları tanımlamak için iki terim kullanılır. Bunlar; alan sargıları ve endüvi sargılarıdır. Genel olarak “alan sargıları” terimi makinede ana manyetik alanı üreten sargılar için ve “endüvi sargıları” terimi de ana gerilimin endüklendiği sargılar için kullanılır. Senkron makinalarda alan sargıları rotor üzerinde bulunduğundan, bu sargılara rotor sargısı da denir. Benzer şekilde endüvi sargıları stator sargıları olarak da isimlendirilir.

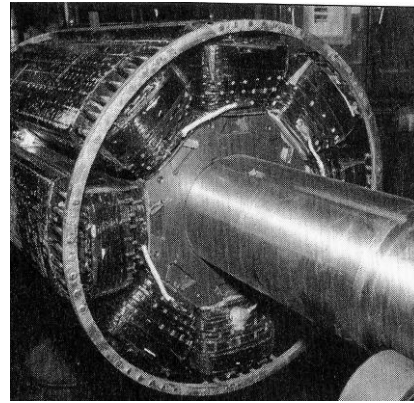
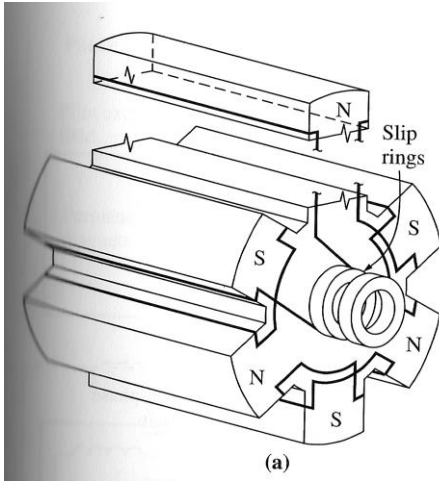
Senkron generatörünün rotoru, aslında büyük bir elektromıknatıstır. Rotor üzerindeki manyetik kutuplar ya çıkık ya da yuvarlak kutupludur. Çıkıklık terimi bir şeyden dışarı çıkmış, dışarıda anlamındadır ve çıkık bir kutup rotorun yüzeyinden dışarı doğru olan manyetik bir kutuptur. Diğer taraftan yuvarlak kutup rotorun yüzeyi ile aynı hizada imal edilmiş olan manyetik bir kutuptur. Yuvarlak kutup yapısı şekil 5.1’de ve çıkık kutuplu bir rotorun yapısı şekil 5.2’de gösterilmiştir.

- a) Rotor Windings or Field Windings
 - a. Salient Pole
 - b. Non Salient Pole
- b) Stator Windings or Armature Windings



Yuvarlak rotorlu iki kutuplu
Bir senkron makinanın rotoru

Side View



Çıkık kutuplu rotor
(altı kutup)

Genel olarak çıkık kutuplu rotorlar 4 veya daha fazla kutuplu olarak imal edilirken yuvarlak kutuplu rotorlar 2 ve 4 kutuplu olarak imal edilirler. Rotor değişken manyetik alana maruz kaldığından girdap akımı kayıplarını düşürmek için ince laminasyonlardan imal edilir.

Rotordaki alan devresinden bir DA akım geçirildiğinden ve rotor döndüğünden, alan sargılarına DA gücün aktarılabilmesi için özel bir yapıya gereksinim vardır. DA gücünü alan sargısına aktarmak için 2 yöntem kullanılır;

1. Bilezik ve fırçalarla rotora harici bir DA kaynaktan güç sağlamak,
2. Senkron generatörünün rotoru üzerine doğrudan monte edilen özel bir DA kaynaktan DA gücü sağlamak.

Bilezikler, makinanın milini (rotoru) tam olarak saran fakat milden izole edilmiş metal halkalardır. DA rotor, yani uyarma sargısının uçları, senkron makinanın rotoru üzerindeki iki bileziğe bağlanır ve her bir bilezik bir fırça ile irtibatlandırılır. Fırçalar çok küçük sürtünme ile elektriği serbestçe ileten grafit benzer karbon bileşenli çubuklardır. Düşük sürtünme, bileziği aşındırmaz. DA gerilim kaynağının pozitif

ucu bir fırçaya negatif ucu da diğer fırçaya bağlanırsa, aynı DA gerilim rotoru hızı veya açısal pozisyondan bağımsız olarak tüm alanlarda alan sargısına uygulanmış olur. Bir senkron makinanın alan sargısına DA gücü iletmek için bilezikler ve fırçalar kullanıldığı zaman bazı problemler ortaya çıkar. Bilezik ve fırça sistemi makinanın bakım gereksinimini artırır. Çünkü fırçalar aşınmaya karşı düzenli olarak kontrol edilmelidir. Ayrıca fırçalardaki gerilim düşümleri, büyük alan akımlarında makine üzerinde önemli güç kayıplarına sebep olabilirler. Bu problemlere rağmen bilezikler ve fırçalar küçük güçlü senkron makinelerin tümünde kullanılırlar. Çünkü DA uyarma akımını sağlayan diğer yöntemler yüksek maliyetlidir.

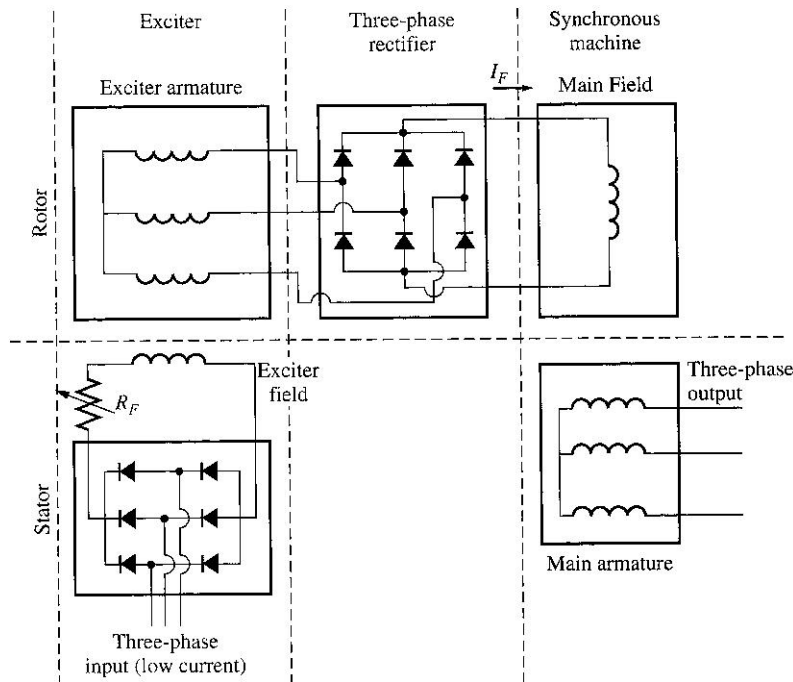
Daha büyük generatör ve motorlarda, makinarya DA uyarma akımını sağlamak için fırçasız uyarıcılar kullanılır. Fırçasız bir uyarıcı, alan sargısı stator üzerine ve endüvi devresi rotor mili üzerine monte edilmiş olan küçük bir AA generatörüdür. Uyarıcı generatörün üç faz çıkışı generatörünün mili üzerine monte edilmiş üç fazlı bir doğrultucu devre ile doğru akıma dönüştürülür ve sonra ana DA alan sargısını besler. Uyarıcı generatörün (stator üzerine yerleştirilen) küçük DA uyarma akımının kontrolü ile, bilezik veya fırça olmadan ana makine üzerindeki uyarma akımını ayarlamak mümkün olur. Bu yapı şematik olarak Şekil 5.3'de ve aynı mil üzerine monte edilmiş fırçasız uyarıcılı bir senkron makine rotoru da Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Rotor ve stator arasında hiçbir mekanik bağlantı bulunmadığından fırçasız bir uyarıcı, bilezik ve fırçalardan çok daha az bakıma gereksinim duyar.

Bilezik ve fırçalar bazı problemlere sahiptir;

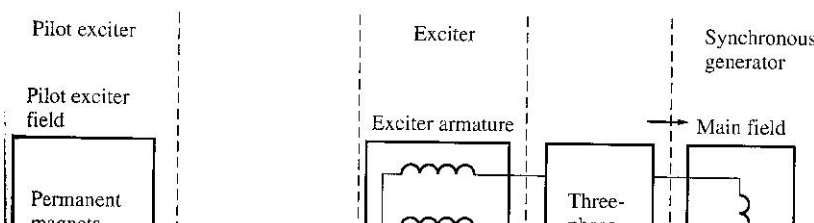
- Fırçalar düzenli olarak aşınma açısından kontrol edilmeleri gerektiğinden, makinede gerekli bakım miktarını artırırlar.
- Fırçadaki gerilim düşümü, daha büyük alan akımlarına sahip makinelerde önemli güç kayıplarına neden olabilir.

Küçük senkron makineler - bilezik ve fırçalar kullanılır.

Büyük senkron makineler – DA alan akımını beslemek için fırçasız uyarıcılar kullanılır.



Fırçasız uyarma sistemi. 3 fazlı küçük bir akım, stator üzerine yerleştirilen uyarıcının alan devresini beslemek için doğrultulur ve uyarıcı alan sargısına uygulanır. Uyarıcı endüvi devresinin çıkışı (rotor üzerindeki) ana makinanın alan devresini beslemek için doğrultulur ve ana alan sargısına uygulanır.



Pilot uyarıcıklı fırçasız bir uyarma sistemi. Pilot uyarıcının sürekli mıknatısları uyarıcının uyarma akımını ve uyarıcı devresi de ana makinanın uyarma akımını üretir.

Generatörün uyarmasını herhangi bir harici güç kaynağından tamamen bağımsız yapmak için, çoğunlukla sistemde küçük bir pilot uyarıcı kullanılır. Bir pilot uyarıcı, rotorunda sürekli mıknatısları ve stator üzerinde üç fazlı sargısı bulunan küçük bir AA generatörüdür. Bu generatör, uyarıcının alan devresi için gereken güçü üretir ve dolayısıyla ana makinanın alan devresin kontrole eder. Eğer generatör mili üzerinde bir pilot uyarıcı varsa, generatörü çalıştırmak için harici bir elektrik gücüne gereksinim olmaz (Şekil 5.5).

Fırçasız uyarıcılar içeren senkron generatörlerin çoğu herhangi bir tehlike anında kullanılabilmesi için aynı zamanda bilezik ve fırçalara da sahiptir.

Senkron generatörün statoru Bölüm 4’de tanımlanmış ve stator yapısının detayları Ek B’de sunulmuştur. Senkron generatörde stator sargıları normalde çift katlı sargı tekniğiyle sarılırlar.

2. Bir Senkron Generatörün Hızı

Senkron generatörlerle birlikte kullanılan senkron kelimesinin bu generatörlerle birlikte kullanılma nedeni elektriksel frekansın, mekanik dönme hızı ile senkron veya kilitli olmasıdır. Bir senkron generatörünün rotoru, doğru akımla beslenene bir elektromıknatıstan ibarettir.

Rotorun manyetik alanı rotorun hangi yöne döneceğini de gösterir. Makinalardaki manyetik alanlarının dönüş hızı ile stator elektriksel frekansı arasındaki bağıntı (4.34) denklemiyle verilir.

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

f_e : elektriksel frekans, Hz

n_m : manyetik alanın mekanik hızı, dev/dak, (senkron makinalar için rotor hızına eşit)

P : kutup sayısı

Rotor manyetik alanla aynı hızda döndüğünden, bu denklem rotor hızı ve oluşan elektriksel frekans arasındaki ilişkiyi de verir. İki kutuplu bir makinada 50 Hz üretmek için rotor 3000 d/dk, dört kutuplu bir makinada 50 Hz üretmek için ise rotor 1500 d/dk’da döndürülmelidir.

3. Bir Senkron Generatörde İndüklenen Gerilim

Bir stator fazında indüklenen gerilimin genliği;

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \phi f$$

Bu gerilim makinadaki akıya, frekansa veya dönme hızına ve makinanın yapısına bağlıdır. Bu denklem aşağıdaki gibi basitleştirilebilir;

$$E_A = K \phi \omega$$

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \text{ (if } \omega \text{ in electrical rads / s)}$$

$$K = \frac{N_c P}{2\sqrt{2}} \text{ (if } \omega \text{ in mechanical rads / s)}$$

İndüklenen gerilim E_A formülünden de görüldüğü gibi doğrudan akı ve hız ile orantılıdır. Fakat akı rotor alan devresinden akan akıya bağlıdır. Uyarma akımı I_f , aşağıdaki şekilden de görüldüğü gibi ϕ akısıyla doğru orantılıdır. E_A doğrudan akıyla orantılı olduğundan, indüklenen gerilim E_A 'da uyarma akımına bağlıdır. Bu değişime, makinanın açık devre (boşta çalışma) karakteristiği veya mıknatıslanma eğrisi denir.

7. The Equivalent Circuit of a Synchronous Generator Senkron Jeneratörlerin Eşdeğer Devresi

E_A , senkron jeneratörün bir fazına ilişkin iç üretilmiş gerilim fazörüdür. Bununla birlikte E_A gerilim değeri, genellikle jeneratörün çıkış uçları arasından ölçülen gerilim değeri değildir. E_A iç üretilmiş gerilim değeri, bir fazın sargı uçları arasındaki gerilim olan V_{faz} değerine, ancak endüvi sargısından hiç akım akmadığında (yüksüz durumda) eşit olur. Sargıdan akım aktığında, neden bu fazdaki V_{faz} değeri, bu faza ilişkin E_A değerine eşit olmaz? Bu iki gerilim fazörü arasındaki ilişki nedir? Bu soruların cevapları eşdeğer devre modeliyle alakalıdır.

E_A ile V_{faz} arasındaki farka neden olan birkaç faktör vardır:

1. Hava aralığındaki manyetik alanın, statordan akan akım nedeniyle bozulması. Bu olay endüvi reaksiyonu olarak adlandırılır.
2. Endüvi sargısının öz endüktans değeri.
3. Endüvi sargısının rezistans değeri
4. Çıkık kutuplu rotor etkisi

Önce ilk 3 faktörün etkilerini araştıracağız. Ve bunlara dayanarak bir makine modeli çıkaracağız. Bu bölümde rotorun yuvarlak kutuplu olduğunu kabul edeceğiz.

Yukarıda sayılan ilk etki ve normal olarak da en büyük etki, endüvi reaksiyonudur. Senkron jeneratörün rotoru döndürüldüğünde jeneratörün stator sargılarında E_A gerilimi indüklenir. Jeneratörün endüvi sargı uçları arasına bir yük bağlandığında sargılardan akım akar. Endüvi sargılarından akan bu üç fazlı stator akımı, makinede (rotorun ürettiği alana ilave olarak) başka bir manyetik alan daha üretir. Üretilen bu stator manyetik alana, rotorun ürettiği manyetik alanı bozarak ortaya çıkan faz gerilimini değiştirir. Bu etki endüvi reaksiyonu olarak adlandırılır, zira endüvi (stator) akımı ilk başta onu üreten (rotorun ürettiği) manyetik alanı etkiler.

Endüvi reaksiyonunu anlamak için şekil 4-8a'da üç fazlı bir statorun içinde dönen iki kutuplu bir rotor gösterilmektedir. Statora bağlı hiçbir yük olmadığı kabul edilmiştir. B_R rotor manyetik alanı, yine B_R maksimum vektör yönüyle uyumlu olan E_A iç üretilmiş gerilimi indükler. Gerilimin polaritesi üstteki iletkenlerde pozitif ve şeklin altındaki iletkenlerde ise negatif olacaktır. Jeneratöre hiçbir yük bağlanmadığında (boşta çalışırken), endüvi akım akışı yoktur ve E_A iç üretilmiş gerilim değeri bu nedenle faz sargı gerilimi V_{faz} değerine eşit olacaktır.

Jeneratörün güç faktörü geri olan bir yükü beslediğini varsayalım. Yük endüktif (geri fazda) olduğu için akımın tepe vektörü, tepe gerilim vektörünün gerisinde kalır (Şekil 4-8b).

Stator sargılarından akan akım kendi başına manyetik alan üretir. Buna stator manyetik alanı B_s denir ve yönü şekil 4-8c’de gösterildiği gibi sağ el kuralıyla bulunur. Stator manyetik alanı B_s statorda kendi başına bir gerilim üretir ve bu gerilim şekilde E_{stat} olarak adlandırılmıştır.

Stator sargılarında yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı iki farklı gerilim bulunduğunda bir fazda üretilen toplam gerilim V_{faz} , iç üretilmiş gerilim ile endüvi reaksiyonu geriliminin toplamıdır:

$$V_{\phi} = V_{faz} = E_A + E_{Stat} \quad (4-4)$$

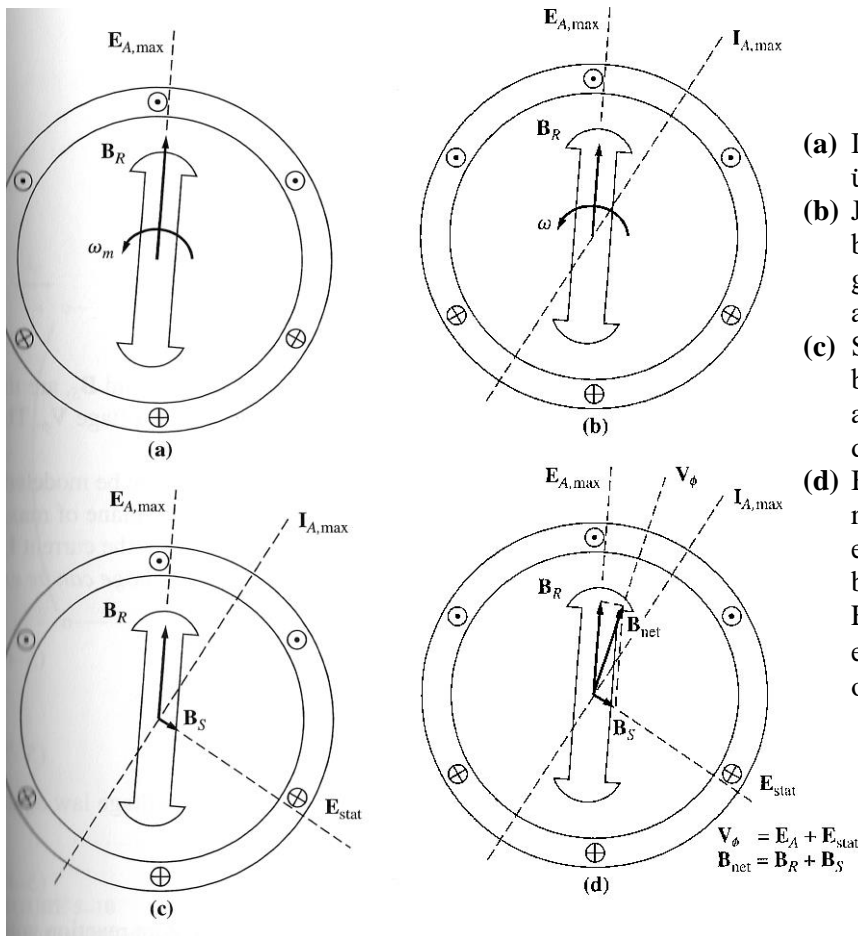
Toplam (net) manyetik alan B_{net} , rotor ve statik manyetik alanlarının toplamına eşittir:

$$B_{net} = B_R + B_S \quad (4-5)$$

E_A ile B_R aynı yönde ve E_{stat} ile B_S aynı yönde olduklarından bileşke manyetik alan B_{net} , net gerilim değeri V_{faz} ile aynı yönde olacaktır. Bileşke akım ve gerilimler şekil 4-8d’de gösterilmiştir.

B_R ile B_{net} arasındaki açı makinanın iç açısı veya moment açısı olarak adlandırılır. Bu açı değeri jeneratör tarafından üretilen güç değeriyle orantılıdır.

Endüvi reaksiyonun faz gerilimi üzerindeki etkileri nasıl modellenebilir? Öncelikle E_{stat} , geriliminin maksimum akım vektörünün I_A ’dan 90° geri fazda olduğuna dikkat edin. İkinci olarak E_{stat} , gerilim değerinin I_A ile doğru orantılı olduğunu görün.



- (a) Dönen manyetik alan, E_A . İç üretilmiş gerilimini indükler
- (b) Jeneratöre GF değeri geri olan bir yük bağlandığında bileşke gerilim vektörü geri fazlı bir akım üretir.
- (c) Stator akımları B_S değerinde bir manyetik alan üretir. Bu alan da stator sargılarında E_{stat} değerinde bir gerilim indükler.
- (d) B_S stator manyetik alanı B_R rotor manyetik alanına eklenerek B_{net} değerinde bir bileşke manyetik alan oluşur. E_{stat} gerilimi E_A gerilimine eklenerek V_{ϕ} faz gerilimini oluşturur.

Şekil 4-8. Endüvi Reaksiyonunun modellenmesi

X orantı sabiti olmak üzere endüvi reaksiyonu gerilimi aşağıdaki gibidir:

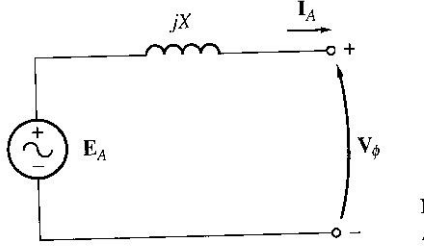
$$E_{stat} = -jXI_A \quad (4-6)$$

Faz gerilim vektörü ise aşağıdaki gibi olur.

$$V_{\phi} = E_A - jXI_A \quad (4-7)$$

Şekil 4-9'da verilen devreye KGY uygulanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$V_{\phi} = E_A - jXI_A \quad (4-8)$$



Şekil (4-9)

4-7 ve 4-8 denklemleri aynı olduğu için endüvi reaksiyonu; E_A iç üretilmiş gerilim vektörü ile X değerinde bir reaktansın seri bağlanması ile modellenebilir.

Endüvi reaksiyonu etkilerine ilave olarak, stator sargıların bir öz endüktansa ve bir rezistansa sahiptir. Statorun öz endüktansı L_A (ve buna karşılık gelen reaktans X_A) ve stator rezistansı R_A olarak adlandırılırsa jeneratör faz gerilimi aşağıdaki gibidir:

$$V_{\phi} = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad (4-9)$$

Endüvi reaksiyonu temsil eden X reaktansı ile X_A ile temsil edilen (makinenin öz endüktansından) reaktans birlikte toplanarak makinenin senkron reaktansı meydana gelir:

$$X_S = X + X_A \quad (4-10)$$

Sonuç olarak makinenin faz sargı gerilimi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (4-11)$$

Şimdi 3 fazlı senkron jeneratörün eşdeğer devresini çizebiliriz (Şekil 4-10). Bu devrede stator alan devresini besleyen bir “da” güç kaynağı vardır. Alan sargı endüktansı ve alan sargı rezistansı seri bağlıdır. Bu devrede, alan akımını kontrol etmek için kullanılan ayar rezistans değeri R_{ayar} ile alan sargı rezistans değeri ile R_{alan} seri bağlıdır. Her bir stator faz sargısı eşdeğer devresi; bir senkron reaktans X_S , stator sargı rezistansını temsil eden R_A ve stator sargısını E_A iç üretilmiş gerilim değerinin seri olarak bağlanmasından oluşmaktadır. Üç fazın gerilimleri ve akımları arasında 120° faz farkı vardır.

Şekil 4-10'da görülen üç faz stator sargı gerilimleri şekil 4-11'de görüldüğü gibi kendi aralarında Y veya Δ olarak bağlanırlar. Eğer bu gerilimler birbirleriyle Y olarak bağlanırsa, jeneratör uç gerilimi V_T , faz-faz gerilimi V_H değerine eşit olacaktır;

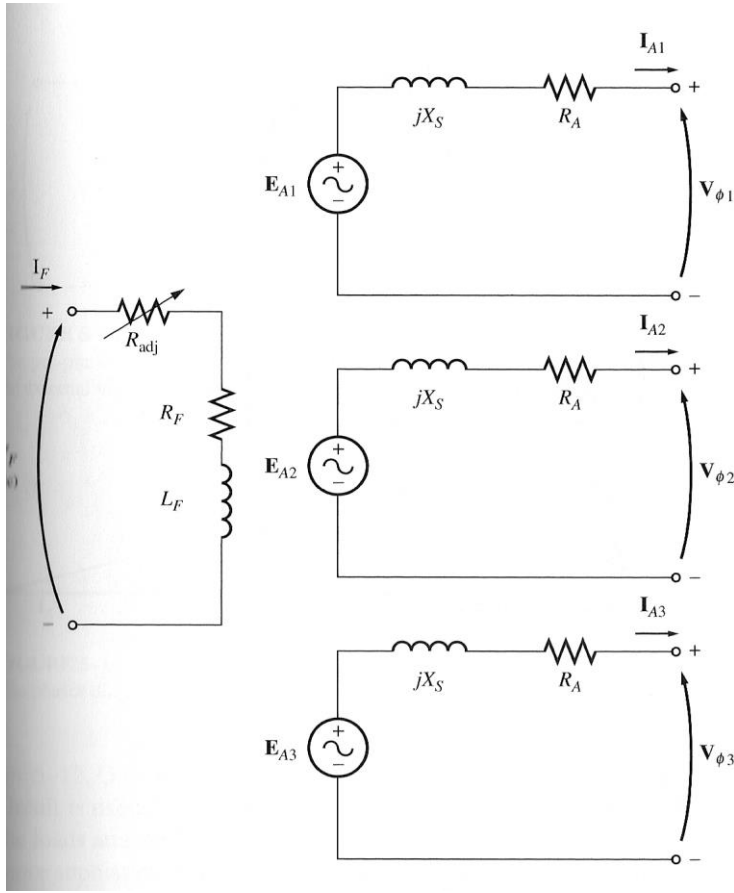
$$V_T = \sqrt{3}V_{\phi} \quad (\text{for } Y \text{ connection})$$

$$V_T = V_{\phi} \quad (\text{for } \Delta \text{ connection})$$

$$V_T = V_H = \sqrt{3} V_{faz} \quad (Y\text{-Yıldız bağlı}) \quad (4-12)$$

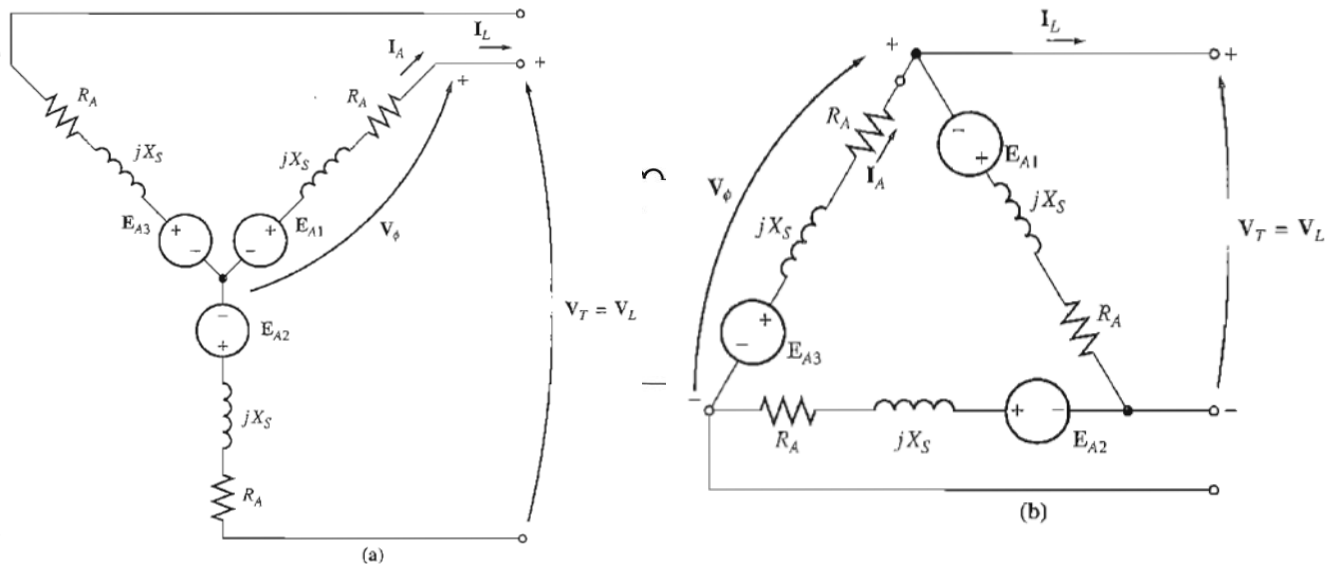
Eğer sargılar Δ bağlanırsa, jeneratör uç gerilimi, statorun faz sargı gerilimine eşit olur;

$$V_T = V_{faz} \quad (\Delta\text{-Üçgen bağlı}) \quad (4-13)$$



Şekil 4-10. Üç fazlı bir senkron jeneratörün tam eşdeğer devresi

Senkron bir jeneratörün üç fazının, faz açısı hariç, her bakımdan aynı olması, faz başına eşdeğer bir devrenin kullanılmasına imkan tanır. Üç faza ilişkin çıkış gerilimleri, yalnızca jeneratörün dengeli üç fazlı bir yükü beslediği durumda aynı gerilim ve aynı akım genlik değerlerine sahip olabilirler.

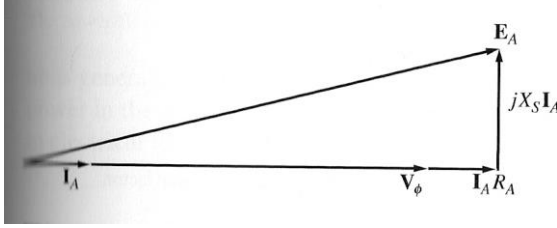


Şekil 4-11. Senkron jeneratör eşdeğer devresi

a) Stator sargıları Y-bağlı, b) Stator sargıları Δ bağlı

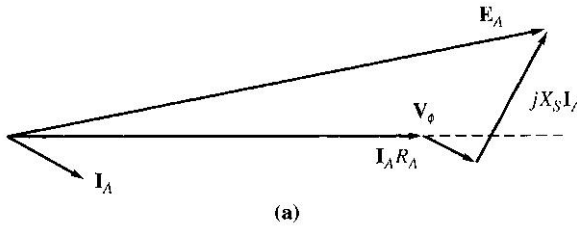
5. Senkron Jeneratörün Fazör Diyagramı

Bir senkron jeneratördeki gerilimler aa olduğundan, genellikle fazörler ile ifade edilirler. Fazörler hem büyüklük hem de açıya sahip oldukları için aralarındaki ilişki iki boyutlu bir çizim (vektörel) ile ifade edilmelidir. Bir faz içerisindeki gerilimler ve fazdaki akım arasındaki ilişkilerin fazör diyagramı adı verilen bir görsel yaklaşımla tanımlanması bu problemlerin çözümünde kullanılan en uygun yoldur.

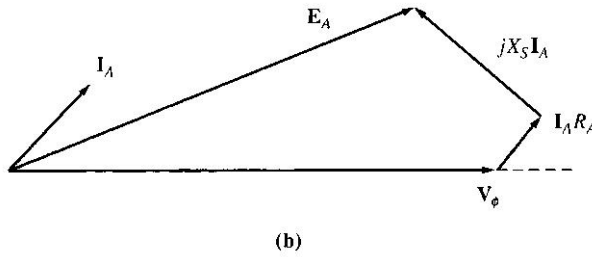


Omik (birim) güç faktörü

Şekil 4-13. Güç faktörü: =1 olduğu durumda senkron jeneratörün fazör diyagramı



Geri güç faktörü (power factor)



İleri güç faktörü (power factor)

Şekil 4-14. Senkron jeneratörün farklı güç faktörlü yüklere ait fazör diyagramları

Şekil 4-14'de GF (PF) değerinin geri ve ileri olduğu yük durumlarında ayrı ayrı elde edilen fazör diyagramları verilmiştir. Verilen bir faz gerilimi ve endüvi akımı için ve GF değeri geri fazlı olan bir yükü beslemek için gerekli EA iç üretilmiş gerilim değerinin, GF değeri ileri fazlı olan bir yükü beslemek için gerekli olan EA iç üretilmiş gerilim değerinden daha büyük olması gerekmektedir. Bu nedenle aynı VT uç gerilimini elde etmek için, yükleri geciktiren daha büyük bir alan akımına ihtiyaç vardır. Yani GF değeri geri fazlı yükleri beslerken, yük akımı arttığında stator sargısı uç gerilimini eski değerinde tutmak için daha yüksek bir değerde, uyarma akımına ihtiyaç duyulacaktır;

$$E_A = K \phi \omega \quad (4-1)$$

Eşitliğinde görüldüğü gibi makinanın ω dönüş hız değerinin sabit kalması için E_A arttırıldığında akı değeri de arttırılmalıdır.

Özetle, verilen bir alan akımı ve yük akımı genlik değeri için uç gerilim değeri; GF değeri geri fazda olan bir yükü beslerken düşük, GF değeri ileri fazda olan bir yükü beslerken yüksektir.

Gerçek senkron makinelerde normalde senkron reaktans değeri, faz sargı rezistans değeri R_A dan çok daha büyüktür.

6. Senkron Jeneratörlerde Güç ve Moment

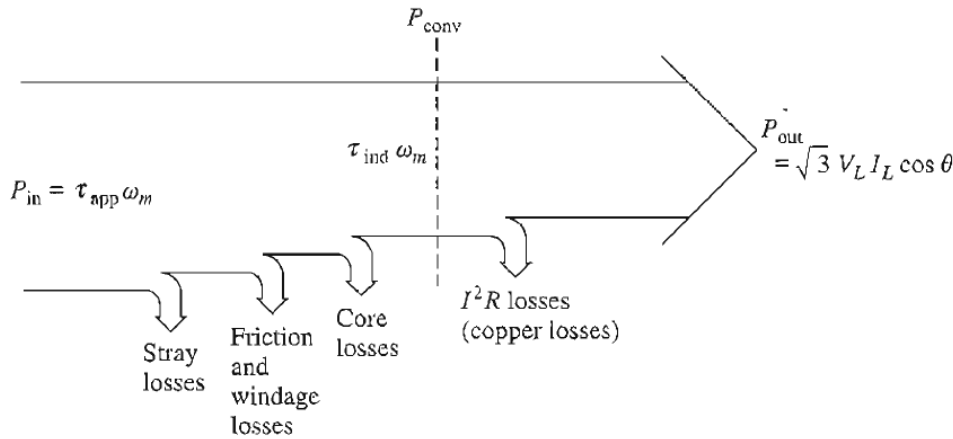
Senkron jeneratör mekanik gücü üç fazlı elektrik gücüne dönüştürür. Mekanik güç kaynağı olarak dizel motor, buhar türbini, su türbini veya benzeri güç kaynakları kullanılabilir. Kaynak ne olursa olsun mekanik güç kaynağından beklenen en önemli özellik, her türlü yük değişimlerinde hızının değişmeden sabit kalabilmesidir. Bu özellik sağlanamasa idi güç sisteminin frekansı sabit tutulamazdı.

Senkron bir jeneratöre verilen mekanik gücün hepsi makineden elektrik enerjisi olarak geri alınamaz. Jeneratörün mekanik gücü ile elektriksel gücü arasındaki fark makinenin kayıpları nedeniyle. Senkron bir jeneratörün güç akış şeması şekil 4-15 de verilmektedir. Giriş mekanik gücü, jeneratörün mil gücü olup değeri $P_{giriş} = \tau_{ind} \omega_m$ olur. Bu güçten jeneratör stator sargısına ancak;

$$\begin{aligned} P_{dönüşüm} &= \tau_{ind} \omega_m \\ &= 3E_A I_A \cos \gamma \end{aligned} \quad (4-14) \text{ ve } (4-15)$$

değeriyle verilen elektrik gücü ulaşabilir. Bu eşitlikteki γ açısı, E_A ile I_A arasındaki açıdır. Çekirdek kayıpları mekanik kayıplar ve parazitik kayıplar düşüldükten sonra giriş gücü azalarak $P_{dönüşüm}$ gücüne düşer. Bu güç, stator sargılarına aktarılan toplam güç değeridir. Bu güç değerinden sargıdaki elektrik kayıpları düşüldükten sonra geriye kalan güç ise yüke aktarılan $P_{çıkış}$ çıkış (elektrik) gücü olur. Eğer hat büyüklükleri kullanılacak ise çıkış gücü

$$P_{çıkış} = \sqrt{3} V_H I_H \cos \theta \quad (4-16)$$



Şekil 4-15 senkron jeneratörün güç akış şeması

Eğer faz büyüklükleri kullanılırsa;

$$P_{çıkış} = 3V_{faz} I_A \cos \theta \quad (4-17)$$

Jeneratörün reaktif gücü hat değerleri cinsinden

$$Q_{çıkış} = 3V_H I_H \sin \theta \quad (4-17)$$

Faz büyüklükleri cinsinden

$$Q_{çıkış} = 3V_{faz} I_A \sin \theta \quad (4-17)$$

Endüvi direnci R_A dikkate alınmazsa ($X_S \gg R_A$) jeneratörün çıkış gücünü yaklaşık olarak belirlemek için çok kullanışlı bir denklem elde edilir. Şekil 4-16 da stator rezistansı göz ardı edilen bir jeneratörün basitleştirilmiş fazör diyagramı dikkate alınmalıdır. Üçgenin düşey dik kenar uzunluğu olan bc değerinin, $E_A \sin \delta$ veya $X_S I_A \cos \theta$ olarak ifade edildiğine dikkat edilmelidir. Bu nedenle;

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_S}$$

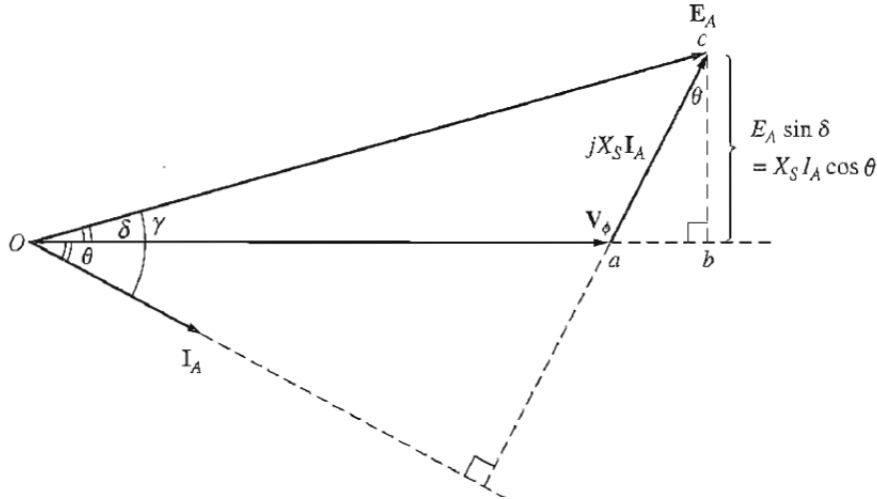
Eşitliği yazılabilir. Son ifade (4-17) eşitliğinde kullanılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$P_{\text{dönüşüm}} = \frac{3V_{\text{faz}} E_A}{X_S} \sin \delta \quad (4-20)$$

(4-20) eşitliğinde rezistanslar ihmal edildiği için jeneratördeki elektriksel kayıplar hesaba katılmamıştır. Bu nedenle $P_{\text{dönüşüm}}$ gücü aynı zamanda $P_{\text{çıkış}}$ gücü olacaktır.

(4-20) ifadesi bir senkron jeneratör tarafından üretilen gücü V_{faz} ve E_A arasındaki açıyla değiştiğini gösterir. Bu açı makinenin iç açısı veya moment açısı olarak bilinir. Ayrıca jeneratörün üretebileceği maksimum güç $\delta=90^\circ$ de gerçekleşecektir.

$$P_{\text{max}} = \frac{3V_{\text{faz}} E_A}{X_S} \quad (4-21)$$



Şekil 4-16. Endüvi rezistansının ihmal edildiği basitleştirilmiş fazör diyagramı

Bir jeneratörde indüklenen moment değeri (manyetik alan yoğunlukları cinsinden);

$$\tau_{\text{ind}} = k B_R \times B_S \quad (3-58)$$

Veya $\tau_{\text{ind}} = k B_R \times B_{\text{net}} \quad (3-60)$

Genliği ise; $\tau_{\text{ind}} = k B_R B_S \sin \delta \quad (3-58)$

Son eşitlikte δ açısı rotor ve bileşke (net) manyetik alan arasındaki açıdır (moment açısı).

B_R , E_A gerilimini B_{net} ise V_{faz} gerilimini ürettiği için E_A ve V_{faz} arasındaki açı ile B_r ve B_{net} arasındaki açıyla aynı değere, yani moment açısına (δ) eşittir.

Senkron jeneratörde indüklenen moment için kullanılabilecek diğer bir eşitlik 4-20 ifadesinden elde edilebilir. $P_{\text{dönüşüm}} = \tau_{\text{ind}} \omega_m$ olduğu için;

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3V_{\text{faz}} E_A}{\omega_m X_S} \sin \delta \quad (4-22)$$

Kısaca, hem senkron jeneratörde mekanik güçten elektriksel güce dönüştürülen $P_{\text{dönüşüm}}$ gücü hem de jeneratörün rotorunda indüklenen τ_{ind} momenti δ moment açısına bağlı olarak değişir. 4-22

$$P_{\text{dönüşüm}} = \frac{3V_{\text{faz}} E_A}{X_S} \sin \delta$$

Input: $P_{\text{in}} = \tau_{\text{app}} \omega_m$

Losses: Stray losses, friction and windage losses, core loss

Converted power: $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m = 3E_A I_A \cos \gamma$
Where γ is the angle between E_A and I_A .

Losses: Copper losses

Output:

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \quad or \quad P_{out} = 3V_\phi I_A \cos \theta$$

$$Q_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \sin \theta \quad or \quad P_{out} = 3V_\phi I_A \sin \theta$$

Based upon the simplified phasor diagram:

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_s}$$

Which gives another form of output power expression (since R_A assumed to be zero):

$$P = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{X_s}$$

From the above equation, it can be seen that power is dependent upon:

- The angle between V_ϕ and E_A which is δ .
- δ is known as the torque angle of the machine.
- maximum torque may be found when $\sin \delta$ is 1 which gives the maximum power (a.k.a. static stability limit) to be:

$$P_{max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_s}$$

The basic torque equation:

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_s = kB_R \times B_{net} = kB_R B_{net} \sin \delta$$

An alternative expression can be derived from the power expression since $P_{out}=P_{conv}$ when R_A assumed to be zero. Because $P_{conv}=\tau_{ind}\omega_m$, the induced voltage is:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{\omega_m X_s}$$

7. Senkron Jeneratör Modeline İlişkin Parametrelerin Ölçülmesi

Senkron jeneratörün eşdeğer devresinde yer alan üç adet büyüklük çok önemlidir. Bir senkron jeneratörün davranışlarını gerçeğe yakın olarak modelleyebilmek için bu üç büyüklüğün doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir;

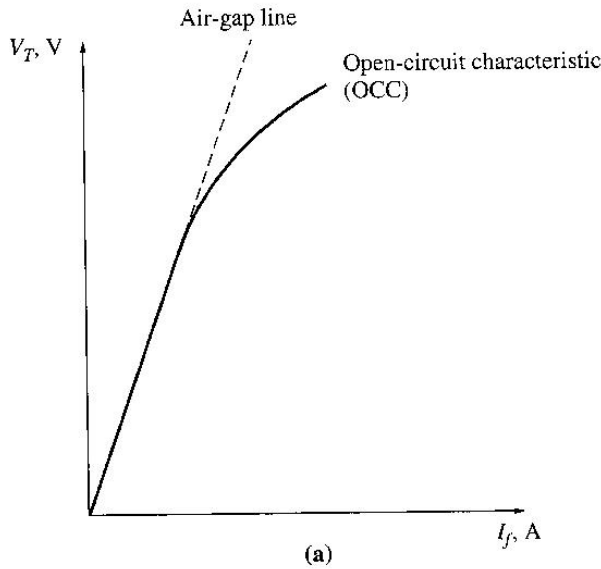
1. Alan akımı ile akı arasındaki ilişki (ve bu nedenle alan akımı ile E_A arasındaki ilişki)
2. Senkron reaktan
3. Endüvi rezistansı

Açık devre testi;

Adımlar:

1. Jeneratör nominal hızda döndürülür.
2. Endüvi uçları yüklerden ayrılır.
3. Alan akımı 0'dan kademeli olarak arttırılır.
4. Alan akımı ve endüvi gerilimi her değer için ölçülür.

Endüvi uçları açıkken, $I_A=0$, dolayısıyla $E_A = V_\phi$ olur. Bu ölçümler sonunda E_A (veya V_T) ile I_F arasında bir eğri çizilebilir. Bu eğri bu jeneratöre ilişkin açık devre karakteristiği (ADK) olarak adlandırılır. Bu karakteristik ile, herhangi bir alan akımı için jeneratörün iç üretilmiş gerilim değerini bulmak mümkündür.



Şekil 4-17. Bir senkron jeneratörün açık devre karakteristiği (ADK veya OCC: open-circuit characteristic)

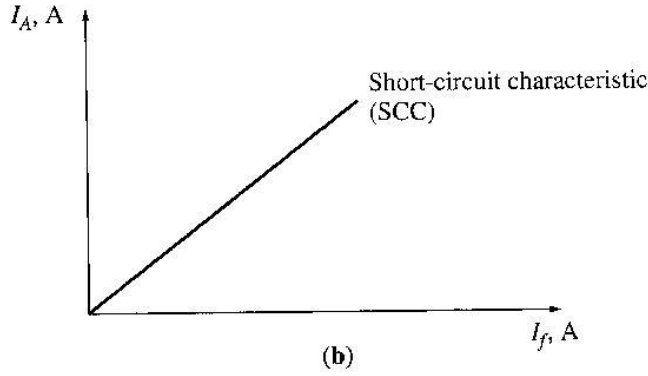
Yüksek alan akımlarında bir miktar doyumluk gözlenene kadar, ilk başlarda eğrinin neredeyse mükemmel bir şekilde doğrusaldır. Senkron makineyi oluşturan doymamış demirin relüktans değeri, makinanın rotor ve statoru arasında kalan hava aralığının relüktans değerinden binlerce kez küçüktür. Bu nedenle ilk başta hemen hemen tüm manyetomotor kuvvet hava aralığı boyuncadır ve ortaya çıkan akı artışı doğrusaldır. Demir nihayet doyuma ulaştığında, demirin relüktans değeri ciddi bir şekilde artar ve akının artış hızı manyetomotor kuvvetteki artış hızına oranla çok çok düşük kalır. Açık devre karakteristiğinin doğrusal bölümüne karakteristiğin hava aralığı hattı denir.

Kısa devre testi

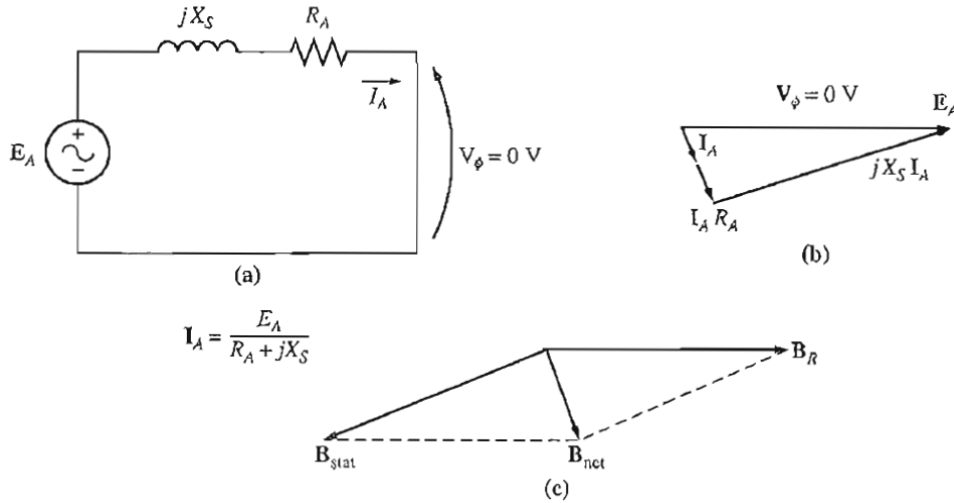
Adımlar:

1. Jeneratörün uçları bir ampermetre üzerinden kısa devre yapılır
2. Alan akımı sıfırdan nominal değerine kadar kademeli arttırılır
3. Endüvi ve hat akımı değeri alan akımının her değeri için ölçülür.

Not: Kısa devre analizi süresince, net manyetik alan çok küçüktür, böylece çekirdek doymamıştır, bu nedenle çizilen eğri doğrusaldır.



Kısa devre karakteristiği (KDK veya SCC: short circuit characteristic) düz bir çizgidir, bunu anlamak için; aşağıdaki eşdeğer devrenin uçları kısa devre edildiğindeki durumu incelemek yeterlidir.



Şekil 4-18. a) Kısa devre testi süresince senkron jeneratörün eşdeğer devresi, b) kısa devre süresince geçerli olan fazör diyagramı, c) kısa devre süresince manyetik alanlara ilişkin fazör diyagramları

Çıkış uçları kısa devre edildiğinde, endüvi akımı I_A ;

$$I_A = \frac{E_A}{R_A + jX_S} \text{ olacaktır, endüvi akımının genliği ise } I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}} \quad (4-23), (4-24)$$

Devrenin fazör diyagramı ve bu fazör diyagramına karşılık gelen manyetik alan fazörleri Şekil 4-18b ve c'de gösterilmektedir.

B_S fazörü neredeyse B_R fazörünü yok ettiği için, B_{net} toplam (bileşke) manyetik alan değeri çok küçük olacaktır (bu durum gerilim düşümünün yalnızca resistans ve endüktans üzerinde olmasına karşılık gelir). Makinenin toplam manyetik alan değeri çok küçük olduğundan, makine doyuma gitmez ve bu nedenle kısa devre karakteristiği doğrusal olarak değişir.

Her iki deneyin sonucu olarak, makinenin iç empedansını bulabiliriz (ADK'den E_A , KDK'den I_A):

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A}$$

$X_S \gg R_A$, olduğu için, bu eşitlik basitleştirilebilir:

$$X_s \approx \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\phi oc}}{I_A}$$

Böylece senkron reaktansı da elde edebiliriz.

Böylece, verilen bir alan akımı değeri için, X_s senkron reaktansı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi bulunur;

1. Verilen alan akımı değeri için ADK eğrisinden E_A iç üretilmiş gerilim değeri tespit edilir.
2. Verilen alan akım değeri için KDK eğrisinden, kısa devre akımı tespit edilir $I_A = I_{A,SC}$.
3. Yukarıdaki eşitlik yardımıyla X_s değeri hesaplanır.

Kısa devre oranı

Tanım:

Açık devre şartlarındaki nominal gerilimi üreten alan akım değerinin, kısa devre şartlarında nominal endüvi akımı üreten alan akım değerine oranıdır.

Problem 5-1

200 kVA, 480 V, 50 Hz, Y-bağlı bir senkron jeneratör, 5 A değerinde nominal bir alan akımı değeri ile test edilmiştir. Bu test sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir:

1. Nominal I_F değerinde, $V_{T,OC} = V_{T,AD} = 540V$
2. Nominal I_F değerinde, $I_{L,SC} = I_{L,KD} = 300A$.
3. İki faz sargı ucu arasına 10 V değerinde bir da gerilim uygulandığında, 25 A değerinde faz sargı akımı ölçülmektedir.

Yukarıdaki ölçüm sonuçlarını kullanarak, endüvi rezistans değerini ve yaklaşık senkron reaktans değerini ohm olarak bulunuz. Jeneratörün nominal değerler altında çalıştığı kabul edilecektir.

Solution

Jeneratör Y-bağlı olduğundan iki faz sargı akımı içinden akacak **da** akım değeri bulunacaktır. Buna göre sargı rezistans değeri aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$2R_A = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R_A = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} = \frac{10 \text{ V}}{(2)(25 \text{ A})} = 0.2 \Omega$$

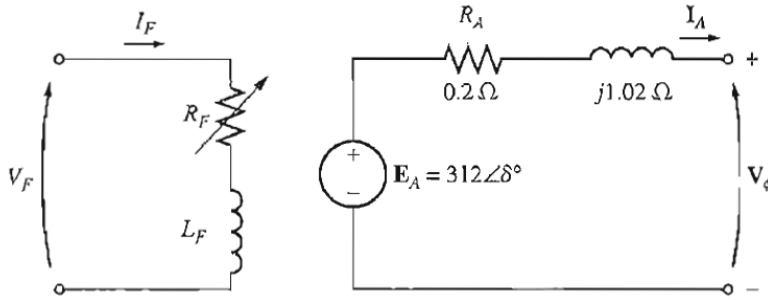
Nominal I_{alan} değerinde iç üretilmiş gerilim değeri aşağıdaki gibi olur;

$$E_A = V_{\phi,OC} = \frac{V_T}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{540 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 311.8 \text{ V}$$

I_A kısa devre akımı jeneratör Y-bağlı olduğundan dolayı hat akımına eşit olacaktır;

$$I_{A,SC} = I_{L,SC} = 300 \text{ A}$$



Şekil 4-20. Problem 4-1’de verilen jeneratörün bir faz sargısına ilişkin eşdeğer devre.

Sonuç olarak verilen alan akım değeri için senkron reaktans değeri (4-25) eşitliğinden bulunabilir:

$$\sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A} \quad (4-25)$$

$$\sqrt{(0.2 \Omega)^2 + X_S^2} = \frac{311.8 \text{ V}}{300 \text{ A}}$$

$$\sqrt{(0.2 \Omega)^2 + X_S^2} = 1.039 \Omega$$

$$0.04 + X_S^2 = 1.08$$

$$X_S^2 = 1.04$$

$$X_S = 1.02 \Omega$$

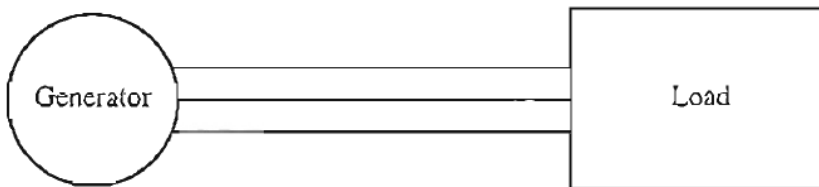
R_A rezistans değerinin X_S senkron reaktansına ilave edilmesi, senkron reaktans değerini ne kadar değiştirdi? Çok değil (4-26) eşitliği kullanılsaydı X_S senkron reaktans değeri;

$$X_S = \frac{E_A}{I_A} = \frac{311.8 \text{ V}}{300 \text{ A}} = 1.04 \Omega$$

Olacaktı. R_A direncini ihmal ederek X_S hesabında yapılan hata, doyum etkisinden kaynaklanan hatadan çok daha azdır. Her bir faz sargısı için geçerli olan eşdeğer devre Şekil 4-20’de verilmiştir.

8. Senkron Jeneratörün Yalnız Çalışması

Bir senkron jeneratörün yük altındaki davranışı, yükün güç faktörüne ve jeneratörün tek başına mı yoksa diğer senkron jeneratörlerle paralel olarak mı çalıştığına bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Bu bölümde, R_A etkisi göz ardı edilmiş fazör diyagramı kullanılacaktır. Aksi belirtilmedikçe jeneratör hızı sabit kabul edilecektir. Ayrıca, jeneratörlerdeki rotor akısının, alan akım değeri açıkça değişmediği sürece sabit olduğu kabul edilecektir.



Şekil 4-21. Bir yükü esleyen, tek başına çalışan bir senkron jeneratör.

Yük değişiminin Yalnız Çalışan Bir Senkron Jeneratör Üzerindeki Etkileri

Bir jeneratörün bir yüke bağlı olduğunu kabul edelim.

Yükü arttıralım:

Yük değerindeki bir artış, jeneratörden çekilen aktif veya reaktif güç değerinde bir artışa neden olur. Böylece bir yük artışı jeneratörden çekilen yük akımını arttırır.

Assumptions:

- Alan rezistans değeri değişilmediğinden, alan akımı sabittir, böylece akı sabittir.
- Jeneratörün rotor hızı sabit tutulur.
- Böylece $E_A = K\phi\omega$ iç üretilmiş gerilimi sabittir.

E_A sabit ise, değişen yük ile ne değişir?

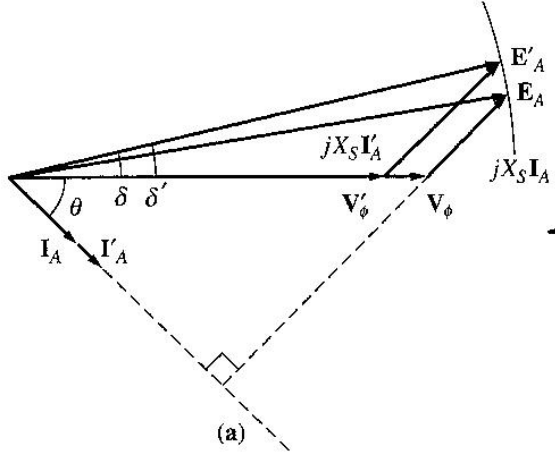
Başlangıçta endüktif bir yükün arttırılması:

- Geri güç faktörlü yük (güç faktörü aynı olmak üzere) arttırılır.
- I_A akımının genlik değeri artacaktır, fakat E_A 'nın referans alınan V_ϕ fazörüne göre olan açısı değişmeyecektir (güç faktörü geri fazda olmayı sürdürmesinden dolayı)
- Endüvi reaksiyonu gerilim düşümü $X_S I_A$ artacak ve fakat açısı aynı kalacaktır.

$$E_A = V_\phi + jX_S I_A$$

$jX_S I_A$ vektörü E_A ile 0° faz açısına sahip V_ϕ arasına bağlanmalıdır. Yeni yük durumunda uyarma akımı (dolayısıyla akı) değişmediğinden, E_A fazörünün genliği de değişmeyecektir.

- E_A 'nın sabit kalması gerektiğine dikkat edilmelidir (daha önce belirtilen varsayımlara bakın)
- Fazör diyagramına dikkatli bakıldığında, yük artışı olduğunda V_{faz} fazörünün keskin şekilde azaldığı gözlenecektir.



GF değeri aynı kalan yeni bir yükün jeneratöre eklenmesi durumunda elde edilen fazör diyagramları

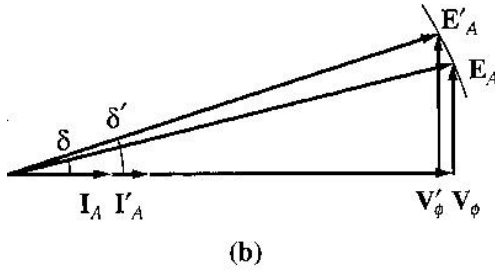
- a) GF geri olan endüktif bir yükün eklenmesi.

Omik bir yükün arttırılması:

- Omik güç faktörlü yük (güç faktörü aynı olmak üzere) arttırılır.
- I_A akımının genliği artacaktır, fakat E_A 'nın referans alınan V_ϕ fazörüne göre olan açısı değişmeyecektir (güç faktörü omik fazda olmayı sürdürmesinden dolayı)
- Endüvi reaksiyonu gerilim düşümü $X_S I_A$ artacak ve fakat açısı aynı kalacaktır.

$$E_A = V_\phi + jX_S I_A$$

- E_A 'nın sabit kalması gerektiğine dikkat edilmelidir (daha önce belirtilen varsayımlara bakın)
- Fazör diyagramına dikkatli bakıldığında, yük artışı olduğunda V_{faz} fazörünün keskin olmayan şekilde azaldığı gözlenecektir.



GF değeri aynı kalan yeni bir yükün jeneratöre eklenmesi durumunda elde edilen fazör diyagramları

- b) GF=1 olan omik bir yükün eklenmesi.

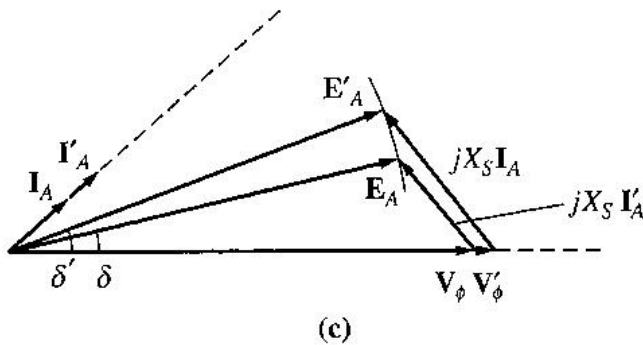
- V_ϕ deki değişim azalacaktır, fakat geri güç faktörlü yüke göre daha az etkileneceği görülebilir.

Kapasitif bir yükün arttırılması:

- İleri güç faktörlü yük (güç faktörü aynı olmak üzere) arttırılır.
- I_A akımının genliği artacaktır, fakat E_A 'nın referans alınan V_ϕ fazörüne göre olan açısı değişmeyecektir (güç faktörü geri fazda olmayı sürdürmesinden dolayı)
- Endüvi reaksiyonu gerilim düşümü $X_S I_A$ artacak ve fakat açısı aynı kalacaktır.

$$E_A = V_\phi + jX_S I_A$$

- E_A 'nın sabit kalması gerektiğine dikkat edilmelidir (daha önce belirtilen varsayımlara bakın)
- Fazör diyagramına dikkatli bakıldığında, yük artışı olduğunda V_{faz} fazörünün keskin olmayan şekilde azaldığı gözlenecektir.



GF değeri aynı kalan yeni bir yükün jeneratöre eklenmesi durumunda elde edilen fazör diyagramları

- c) GF ileri olan kapasitif bir yükün eklenmesi.

Yukarıdaki açıklanan senkron jeneratör davranışlarından çıkan sonuçlar şöyle özetlenebilir;

1. Eğer jeneratöre eklenen yük endüktif ise, V_{faz} ve V_T uç gerilimi önemli ölçüde azalır.
2. Eğer jeneratöre eklenen yük omik ise, V_{faz} ve V_T uç gerilimi çok az miktarda düşer.
3. Eğer jeneratöre eklenen yük kapasitif ise, V_{faz} ve V_T uç gerilimi artar.

İki jeneratörün gerilim davranışını karşılaştırmanın bir diğer yolu, onların gerilim ayarı cinsinden karşılaştırılmasıdır. Gerilim ayarı (GA veya VR: Voltage regulation) aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$GA = \frac{V_{yy} - V_{ty}}{V_{ty}} \times 100\% \quad (3-67)$$

Burada, V_{yy} : yük yokken gerilim değeri, V_{ty} : tam yükteki gerilim değeridir.

Bu durumu açıklamak için diğer bir yol da gerilim ayarı (regülasyonu) aracılığıyla yapılabilir;

- Geri yani endüktif yük için, GA (VR) çok pozitif olacaktır
- İleri yani kapasitif yük için, GA (VR) negatif olacaktır
- Birim yani omik yük için, GA (VR) pozitif olacaktır

Ancak, pratikte bir jeneratörün çıkış gerilimini sabit tutmak en iyisidir, bu nedenle E_A gerilimi, alan akımı I_F kontrol edilerek kontrol edilmelidir. Değişen I_F , çekirdek içindeki akıyı değiştirecek ve daha sonra E_A 'da buna göre değişecektir (**refer OCC**).

How must a generator's field current be adjusted to keep V_T constant as the load changes?

Bir jeneratöre geri güç faktörlü endüktif bir yük bağlandığında jeneratör uç gerilimi düşecektir. Uç gerilim değerini eski değerine yükseltmek için R_{alan} rezistans değerinin düşürülmesi gerekir. R_{alan} değeri azalırsa I_{alan} akımı artacaktır. I_{alan} artışı akıyı arttırarak E_A değerini arttırır. E_A değerindeki artış faz sargısı uç gerilim değerini yükseltir. Bunları maddeler halinde özetlersek;

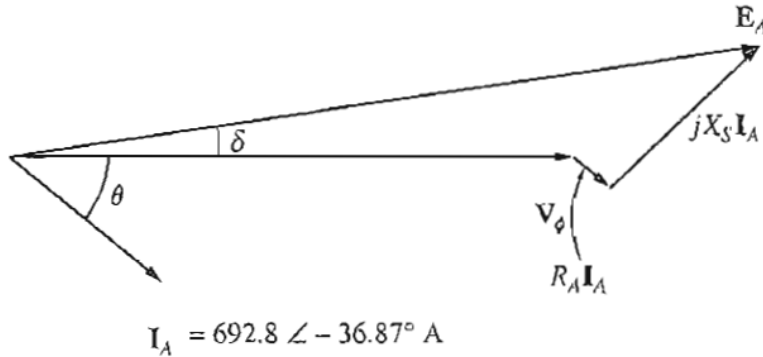
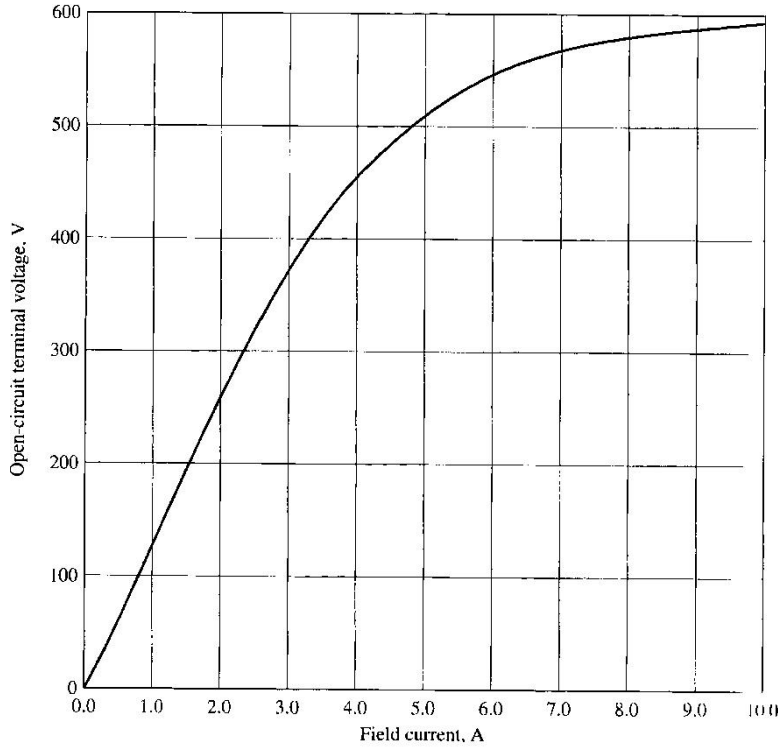
1. Alan sargısı devresindeki rezistans değerinin azalması alan akımı değerini arttırır
2. Alan akımındaki artış makinede üretilen akıyı arttırır
3. Akı miktarındaki artış ise $V_{sargı}$ endüvi sargı gerilim değerini arttırır ve sonuç olarak endüvi sargısı uç gerilim değeri V_T artar. Böylece yük değişiminden kaynaklanan gerilim değişimi telafi edilmiş olur.

Problem 4-2

480 V, 60 Hz, Δ -bağlı, 4-kutuplu yuvarlak rotorlu senkron jeneratöre ilişkin ADK (OCC) eğrisi Şekil 4-23'de verilmiştir. Jeneratörün senkron reaktans değeri 0.1Ω ve endüvi rezistansı 0.015Ω dur.

Tam yük şartları altında makine 1200A $GF=0.8$ geri (endüktif) değerinde bir yükü beslemektedir. Bu şartlar altında jeneratöre ait mekanik kayıplar 40kW, çekirdek kayıpları 30kW'dır. (Uyarma alan kayıpları ihmal edilmektedir)

- (a) Jeneratörün dönüş hızı nedir?
- (b) Yük yokken jeneratör uç gerilim değerini 480 V yapacak uyarma akım değeri nedir?
- (c) Jeneratöre 1200 A, $GF=0.8$ (geri) değerinde bir yük bağlandığında jeneratör uç geriliminin 480 V değerinde tutacak alan akımı değeri nedir?
- (d) Jeneratörün ürettiği güç değeri nedir? Tahrik makinesi tarafından jeneratöre aktarılan güç değeri nedir? Jeneratörün toplam verimi nedir?
- (e) Eğer yük aniden jeneratörden ayrılırsa, bu durumda jeneratörün uç gerilim değeri ne olur?
- (f) Eğer bu jeneratör yük olarak 1200 A, $GF=0.8$ (ileri) değerinde bir yük besleseydi, uç gerilim değerinin 480 V yapacak alan akımı değeri ne olurdu?



Şekil 4-23. Problem 4-2'ye ilişkin jeneratörün açık devre karakteristiği ve fazör diyagramı

Çözüm: Jeneratör Δ -bağlı olduğundan jeneratörün faz gerilimi uç gerilimine eşit olacaktır ($V_{\text{faz}}=V_T$)

Her hat akımı ile faz akımı arasında ise $I_H = \sqrt{3} I_{\text{faz}}$ ilişkisi vardır.

- a) Jeneratörün ürettiği elektriksel frekans değeri ile makine milinin mekanik dönme hızı arasında (3-34) eşitliği ile verilen bağıntı vardır;

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120} \quad (3-34)$$

$$n_m = \frac{120 f_{se}}{P} = \frac{120(60 \text{ Hz})}{4 \text{ poles}} = 1800 \text{ r/min}$$

- b) Bu jeneratörde $V_{\text{faz}}=V_T$ eşitliği geçerlidir. Yük yokken $I_A=0$ ve $E_A=V_{\text{faz}}$ olur. Bu yüzden $V_T=V_{\text{faz}}=E_A=480 \text{ V}$ ve açık devre karakteristiğinden $I_{\text{alan}}=4,5 \text{ A}$ olacaktır.
- c) Jeneratör 1200 A ürettiği için endüvi akım değeri

$$I_A = \frac{1200 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 692.8 \text{ A}$$

Olacaktır. Bu jeneratöre ilişkin fazör diyagramı Şekil 4-23b'de verilmiştir. Eğer uç gerilim değeri 480 V a ayarlanırsa E_A jeneratörün iç üretilmiş gerilim değeri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned}
 E_A &= V_\phi + R_A I_A + jX_S I_A \\
 &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + (0.015 \Omega)(692.8 \angle -36.87^\circ \text{ A}) + (j0.1 \Omega)(692.8 \angle -36.87^\circ \text{ A}) \\
 &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + 10.39 \angle -36.87^\circ \text{ V} + 69.28 \angle 53.13^\circ \text{ V} \\
 &= 529.9 + j49.2 \text{ V} = 532 \angle 5.3^\circ \text{ V}
 \end{aligned}$$

Yukarıda elde edilen sonuca göre, uç gerilimini 480 V da tutmak için E_A değeri 532 V a ayarlanmalıdır. Şekil 4-23 de verilen eğriden alan akım değerinin $I_{\text{alan}}=5,7 \text{ A}$ olduğu görülür.

- d) Jeneratörün ürettiği güç değeri (4-16) eşitliğinden bulunabilir.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad (4-16) \\
 &= \sqrt{3}(480 \text{ V})(1200 \text{ A}) \cos 36.87^\circ \\
 &= 798 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Jeneratör giriş gücünü bulmak için Şekil 4-15 de verilen güç akış diyagramından faydalanılır. Bu diyagrama göre mekanik giriş gücü aşağıdaki gibi olacaktır;

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_{\text{elec loss}} + P_{\text{core loss}} + P_{\text{mech loss}} + P_{\text{stray loss}}$$

Parazitik kayıplar göz önüne alınmayacaktır. Jeneratördeki elektriksel kayıplar;

$$\begin{aligned}
 P_{\text{elec loss}} &= 3I_A^2 R_A \\
 &= 3(692.8 \text{ A})^2(0.015 \Omega) = 21.6 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Olacaktır. Çekirdek kaybı 30 kW, mekanik sürtünme ve hava sürtünme kaybı toplamı 40 kW olduğundan toplam giriş güç değeri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$P_{\text{in}} = 798 \text{ kW} + 21.6 \text{ kW} + 30 \text{ kW} + 40 \text{ kW} = 889.6 \text{ kW}$$

Buna göre jeneratörün toplamda verimi aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = \frac{798 \text{ kW}}{889.6 \text{ kW}} \times 100\% = 89.75\%$$

- e) Yük aniden jeneratörden ayrılırsa $I_A=0$ olacaktır. Bu durumda $E_A=V_{\text{faz}}$ olur. Alan akımı değişmediği için değeri de değişmeyecektir. Bu durumda V_{faz} ve V_T değerleri yükselecek ve E_A değerine eşit olacaktır. Bu nedenle yük aniden ayrılırsa, jeneratörün uç gerilimi 532 V a yükselecektir.
- f) Jeneratör, uç gerilimi 480 V iken, 1200 A GF=0,8 ileri değerinde bir yükü beslerse, jeneratörün iç üretilmiş gerilim değeri aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\begin{aligned}
 E_A &= V_\phi + R_A I_A + jX_S I_A \\
 &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + (0.015 \Omega)(692.8 \angle 36.87^\circ \text{ A}) + (j0.1 \Omega)(692.8 \angle 36.87^\circ \text{ A}) \\
 &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + 10.39 \angle 36.87^\circ \text{ V} + 69.28 \angle 126.87^\circ \text{ V} \\
 &= 446.7 + j61.7 \text{ V} = 451 \angle 7.1^\circ \text{ V}
 \end{aligned}$$

Bu nedenle, eğer V_T değeri 480 V da tutulacak ise E_A jeneratörün iç üretilmiş gerilim değeri 451 V a ayarlanmalıdır. Açık devre karakteristiği kullanılarak bu gerilim değeri için alan akımının 4,1 A e ayarlanması gerektiği görülür.

Problem 4-3

480V, 50Hz, Y-bağlı, 6-kutuplu senkron yuvarlak rotorlu senkron jeneratörünün faz başına senkron reaktans değeri 0,1 Ω olur. Tam yük şartlarında makine 60 A GF=0.8 (geri) değerinde bir yükü beslemektedir. 60 Hz’de tam yük şartlarında bu jeneratöre ilişkin mekanik kayıplar 1.5 kW çekirdek kaybı ise 1 kW’tır. Endüvi rezistans değeri ihmal edilecektir (dolayısıyla I^2R kayıpları da). Uyarma akımı, yüksüz durumda uç gerilimi 480V olacak şekilde ayarlanmıştır.

- (a) Jeneratörün dönüş hızı nedir?
- (b) Aşağıdaki kabuller altında jeneratörün uç gerilim değeri ne olur?
1. Nominal yük akımı GF= 0.8 geri.
 2. Nominal yük akımı GF= 1.0 için.
 3. Nominal yük akımı GF= 0.8 ileri.
- (c) Nominal yük akımı GF=0.8 (geri) için jeneratörün verimi nedir? (bilinmeyen elektriksel kayıpları ihmal edin)
- (d) Tam yükte tahrik makinesi tarafından mile uygulanan moment değeri nedir? İndüklenen moment ne kadar büyüktür?
- (e) GF=0.8 geri için jeneratör GA (VR) değeri nedir? GF=1.0 için nedir? GF=0.8 ileri için nedir?

Çözüm:

Jeneratör Y-bağlı olduğundan jeneratörün faz gerilimi ile uç gerilimi arasında $V_{faz} = V_T / \sqrt{3}$ ilişkisi vardır.

Bu durumda $V_T=480$ V için $V_{faz}=277$ V olacaktır. Alan akımı $V_{T,yy}=480$ V kalacak şekilde ayarlanmıştır. Bu nedenle, $V_{faz}=277$ V olacaktır. Yük yokken endüvi akımı 0, bu nedenle endüvi reaksiyon gerilimi ve $R_A I_A$ gerilim düşüm değeri de 0 olacaktır. $I_A=0$ olduğundan, $E_A=V_{faz}=277$ V olacaktır. İç üretilmiş gerilim değeri $E_A (=K\phi\omega)$ ancak alan akımı ile değiştirilebilir. Problemden alan akımının başlangıçta ayarlandığı, sonra serbest bırakıldığı anlaşılmaktadır. İç üretilmiş gerilim değeri $E_A=V_{faz}=277$ V olup bu örnekte değeri değişmemektedir.

- a) Jeneratörün dönüş hızı dev/dak olarak (4-34) eşitliği ile verilmiştir;

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120} \quad (3-34)$$

$$n_m = \frac{120 f_{se}}{P}$$

$$= \frac{120(50 \text{ Hz})}{6 \text{ poles}} = 1000 \text{ r/min}$$

Olacaktır. Alternatif olarak, hızın rad/s cinsinden değeri ise aşağıdaki gibi olur,

$$\omega_m = (1000 \text{ r/min}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ r}} \right)$$

$$= 104.7 \text{ rad/s}$$

- b) ...

1. Eğer jeneratör tam yükte GF=0.8 (geri) değerinde yüklenmiş ise fazör diyagramı Şekil 4-24a da gösterildiği gibi olacaktır. Bu diyagramda V_{faz} açısının olduğunu biliyoruz. E_A 'nın genliği 277 V, senkron reaktans gerilim düşümü $jX_S I_A$ ise aşağıdaki gibi olacaktır;

$$jX_S I_A = j(1.0 \Omega)(60 \angle -36.87^\circ \text{ A}) = 60 \angle 53.13^\circ \text{ V}$$

V_{faz} 'ın genliği ve δ açısı değeri bilinmemektedir. Bu iki değeri bulmak için kullanılacak en basit yöntem fazör diyagramında sağ taraftaki üçgeni kullanmaktır. Bu üçgenden aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$E_A^2 = (V_\phi + X_S I_A \sin \theta)^2 + (X_S I_A \cos \theta)^2$$

Sonuç olarak GF=0,8 geri için ve nominal yükte faz gerilimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$(277 \text{ V})^2 = [V_\phi + (1.0 \Omega)(60 \text{ A}) \sin 36.87^\circ]^2 + [(1.0 \Omega)(60 \text{ A}) \cos 36.87^\circ]^2$$

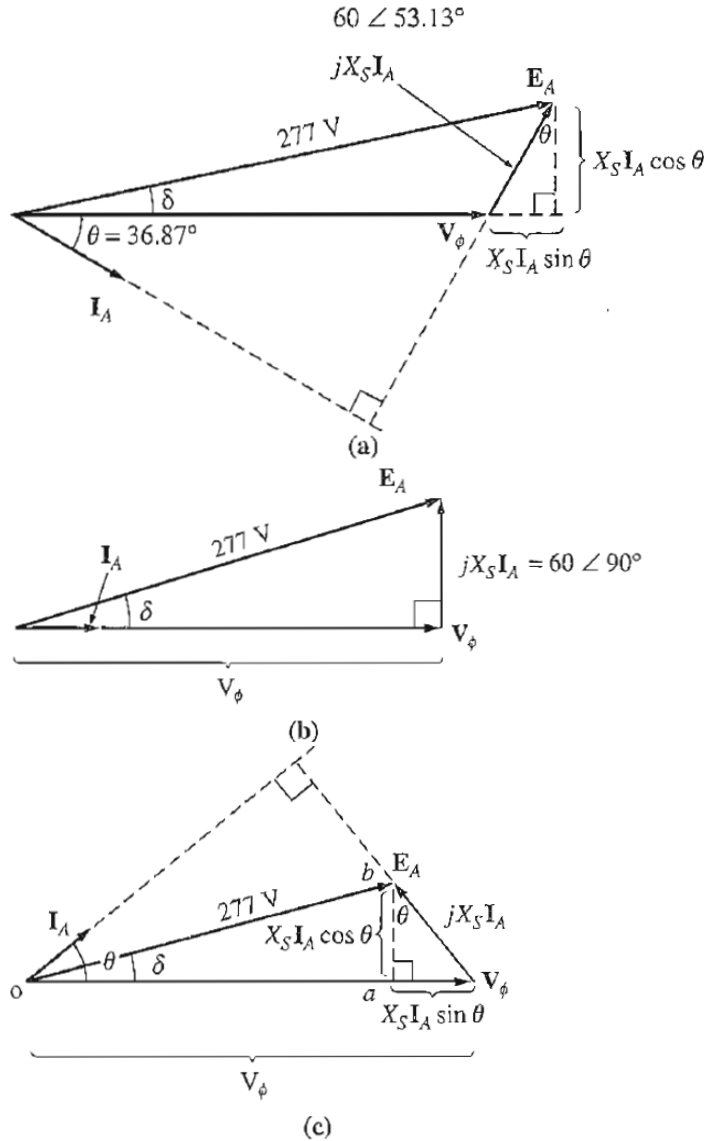
$$76,729 = (V_\phi + 36)^2 + 2304$$

$$74,425 = (V_\phi + 36)^2$$

$$272.8 = V_\phi + 36$$

$$V_\phi = 236.8 \text{ V}$$

Jeneratör Y-bağlı olduğundan $V_T = \sqrt{3} V_{faz} = 410 \text{ V}$ olur.



Şekil 4-24. Problem 4-3'e ilişkin fazör diyagramları a) GF geri için, b) GF=1 için, c) GF ileri

2. Eğer jeneratör tam yükte GF=1 değerinde yüklenmiş ise fazör diyagramı Şekil 4-24b'de gösterildiği gibi olacaktır. Bu diyagramda sağ taraftaki üçgenden Vfaz değeri bulunabilir.

$$\begin{aligned}
 E_A^2 &= V_\phi^2 + (X_S I_A)^2 \\
 (277 \text{ V})^2 &= V_\phi^2 + [(1.0 \Omega)(60 \text{ A})]^2 \\
 76,729 &= V_\phi^2 + 3600 \\
 V_\phi^2 &= 73,129 \\
 V_\phi &= 270.4 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Jeneratör Y-bağlı olduğundan $V_T = \sqrt{3} V_{\text{faz}} = 468,4 \text{ V}$ olur.

3. Eğer jeneratör tam yükte GF=0,8 ileri değerinde yüklenmiş ise fazör diyagramı Şekil 4-24c'de gösterildiği gibi olacaktır. Bu diyagramda Vfaz değerini bulabilmek için şekildeki oab üçgeni kullanılacaktır. Bu üçgenden aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$E_A^2 = (V_\phi - X_S I_A \sin \theta)^2 + (X_S I_A \cos \theta)^2$$

Sonuç olarak GF=0,8 ileri için ve nominal yükte faz gerilimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\begin{aligned}
 (277 \text{ V})^2 &= [V_\phi - (1.0 \Omega)(60 \text{ A}) \sin 36.87^\circ]^2 + [(1.0 \Omega)(60 \text{ A}) \cos 36.87^\circ]^2 \\
 76,729 &= (V_\phi - 36)^2 + 2304 \\
 74,425 &= (V_\phi - 36)^2 \\
 272.8 &= V_\phi - 36 \\
 V_\phi &= 308.8 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Jeneratör Y-bağılı olduğundan $V_T = \sqrt{3} V_{faz} = 535 \text{ V}$ olur.

- c) Yük akımı $GF=0,8$ geri ve 60 A değeri içim bu jeneratörün çıkış gücü aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= 3 V_\phi I_A \cos \theta \\
 &= 3(236.8 \text{ V})(60 \text{ A})(0.8) = 34.1 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Mekanik giriş gücü ise aşağıdaki gibi olur;

$$\begin{aligned}
 P_{in} &= P_{out} + P_{elec \text{ loss}} + P_{core \text{ loss}} + P_{mech \text{ loss}} \\
 &= 34.1 \text{ kW} + 0 + 1.0 \text{ kW} + 1.5 \text{ kW} = 36.6 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Buna göre jeneratörün toplam verimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{34.1 \text{ kW}}{36.6 \text{ kW}} \times 100\% = 93.2\%$$

- d) Jeneratörün giriş momenti aşağıdaki eşitlikte bulunur;

$$P_{in} = \tau_{app} \omega_m$$

$$\tau_{app} = \frac{P_{in}}{\omega_m} = \frac{36.6 \text{ kW}}{125.7 \text{ rad/s}} = 291.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Buna göre indüklenen moment değeri aşağıdaki güç eşitliği yardımı ile hesaplanabilir;

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_v} = \frac{34.1 \text{ kW}}{125.7 \text{ rad/s}} = 271.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- e) Gerilim ayarı (GA) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100\% \quad (3-67)$$

Yukarıdaki tanıma göre GA (VR) değeri; GF geri, GF=1 ve GF ileri için aşağıdaki değerleri alacaktır;

$$1. \text{ Lagging case: } VR = \frac{480 \text{ V} - 410 \text{ V}}{410 \text{ V}} \times 100\% = 17.1\%$$

$$2. \text{ Unity case: } VR = \frac{480 \text{ V} - 468 \text{ V}}{468 \text{ V}} \times 100\% = 2.6\%$$

$$3. \text{ Leading case: } VR = \frac{480 \text{ V} - 535 \text{ V}}{535 \text{ V}} \times 100\% = -10.3\%$$

9. AA Jeneratörlerin Paralel Olarak Bağlanması

Gerçek hayatta tüm yüklerin ihtiyacını karşılamak için çok sayıda jeneratör paralel olarak çalıştırılır. Senkron jeneratörlerin paralel olarak çalıştırılma sebepleri şunlardır.

- 1) Daha fazla yük besleyebilir.
- 2) Güç sisteminin güvenilirliğini artırır.

- 3) Zira güç dağıtımı kesilmeksizin bakım yapılabilir.
- 4) Sadece bir jeneratör kullanılıyorsa ve tam yükte çalışmıyorsa verimi düşük olacaktır. Paralel olarak çalışan jeneratörlerde yüke bağlı olarak jeneratörler çalıştırılabilir. Dolayısıyla devredeki jeneratör tam yüke yakın çalıştırıldığından sistemin verimi artar.

Paralel Çalışma Şartları

-Şekil 4.26' da bir yükü besleyen G1 senkron jeneratörü ve S1 anahtarı kapatıldığında G1 ile paralel çalışmaya hazır başka bir senkron jeneratörü olan G2 gösterilmiştir. S1 anahtarı kapatılmadan yani 2 jeneratör paralel çalıştırılmadan önce hangi şartlar yerine getirilmelidir.

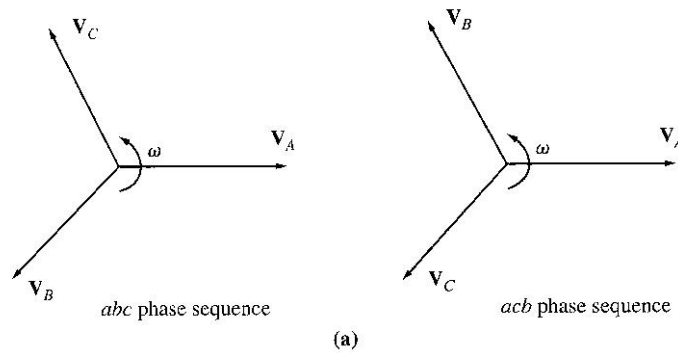
Anahtar aniden kapatılırsa jeneratör ciddi zarar görebilir.

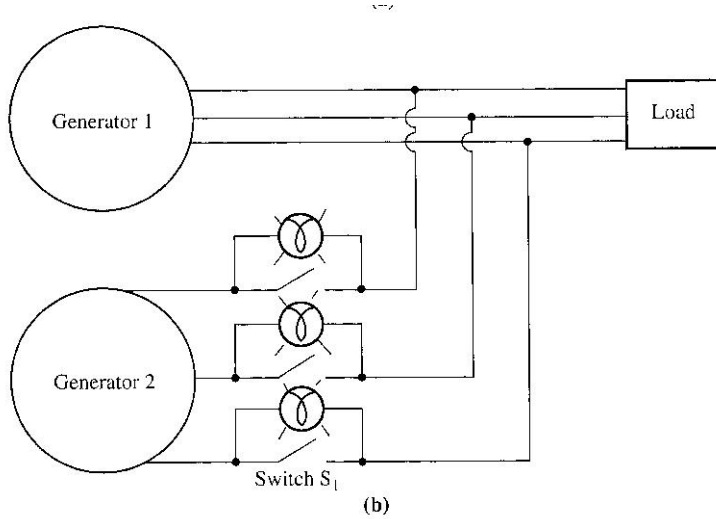
İki jeneratörü birbirine bağlayan iletken telin her iki ucu arasındaki gerilim değeri eşit değilse anahtar kapatıldığında çok büyük bir akım akacaktır. Bu nedenle, iki jeneratörün üç fazını birbirine bağlayan iletkenlerin her birinin iki ucu arasındaki gerilim fazörlerinin hem genlik hem de açılarının aynı olması gerekir. Bunun için aşağıdaki paralel bağlanma şartlarının yerine getirilmesi gerekir.

- 1) Her iki jeneratörün uç geriliminin (Her faz için) etkin değerleri birbirlerine eşit olmalıdır.
- 2) Her iki jeneratörde aynı faz sırasına eşit olmalıdır.
- 3) Her iki jeneratörün ilgili fazlara ilişkin faz açıları da eşit olmalıdır.
- 4) Sisteme yeni bağlanacak frekansın, halen çalışmakta olan jeneratörün frekansına eşit olmalı veya çok az yüksek bir frekansta olmalıdır.

Şekil 4-27a'da gösterildiği gibi faz sırası farklıysa bir gerilim çifti aynı fazda olsa dahi, diğer iki gerilim çifti arasında 120 derece faz farkı vardır. Jeneratörler bu şekilde bağlanırsa diğer iki fazlar arasında büyük değerde akım akar ve her iki makineye de zarar verir. Bunu düzeltmek için b ve c fazlarının yerinin değiştirilmesi gerekir.

Eğer frekans değerleri birbirine yakın değilse jeneratörler ortak bir frekans değerine ulaşınca kadar yüksek güçlü geçici olaylar meydana gelir. İki makinenin frekansları tam eşit değerde olmasa da birbirlerine yakın olmalıdır.





Şekil 4-27 a) Üç fazlı sistemde mümkün olabilecek iki faz gösterimi b) faz sıralarını kontrol etmek için kullanılan yanan üç lamba yöntemi.

Jeneratörlerin Paralel olarak çalışabilmesi için Genel Kurallar

G2 jeneratörünü aşağıdaki gibi çalışan bir sisteme bağlamaya çalıştığımızı varsayalım;

1. Voltmetreler kullanılarak, bağlanacak olan jeneratörün alan akımı, onun uç gerilimi çalışan sistemin hat gerilimine eşit oluncaya kadar ayarlanmalıdır.
2. Sisteme yeni bağlanacak olan jeneratörün faz sırası çalışan sistemin faz sırası ile karşılaştırılmalı ve kontrol edilmelidir. Bunu yapmak için iki yöntem vardır:
 - i. İki jeneratörün her birinin uçlarına küçük güçlü asenkron motor bağlanır. Eğer motor her zaman aynı yönde dönerse faz sıraları aynı demektir. Motorlar birbirine ters yönde dönüyorsa, faz sıraları farklıdır ve faz sıralarını düzeltmek için paralel bağlanacak olan jeneratörün herhangi iki fazı ye değiştirilmelidir.
 - ii. Diğer yöntem yanan üç lamba yöntemidir. Jeneratörü sisteme bağlayan uçları arasına Şekil 4-27b'deki gibi üç lamba bağlanır. İki sistem arasındaki faz değiştikçe lambalar önce parlaklaşır sonra da söner. Her üç lamba da birlikte parlaklaşır birlikte sönerse faz sıraları aynı demektir. Eğer lambalar aynı anda değil) art arda parlaklaşırsa faz sıraları aynı değil demektir.
 - iii. Synchroscope kullanarak; faz açılarındaki farkı ölçen bir ölçü aletidir (faz sırasını kontrol etmez, sadece faz açılarının ölçer).
3. Check and verify **generator frequency** to be slightly higher than the system frequency. This is done by watching a frequency meter until the frequencies are close and then by observing changes in phase between the systems.
4. Jeneratör frekansının sistem frekansından biraz daha yüksek olup olmadığını kontrol etmek ve ayarlamak gerekir. Bunun için frekan smetre ile frekanslar izlenerek ve fazlar arası fark gözlemlenerek yapılır. Sisteme bağlanacak jeneratör, kendi frekansı mevcut jeneratörün frekansından biraz büyük olursa jeneratör, biraz küçük olursa motor olarak çalışacaktır.
5. Frekanslar neredeyse birbirine eşit olduğunda, iki sistemdeki gerilimlerin açıları birbirine göre çok yavaş bir şekilde değişecektir. Böylece faz değişimleri gözlemlenir ve faz açıları eşit olduğunda iki jeneratör birbirlerine bağlayan anahtar kapatılır.

Normalde, güç sistemlerinde büyük jeneratörlerin güçlü bir sisteme bağlanması otomatik olarak ve bilgisayarlar yardımıyla yapılmakta, fakat küçük güçlerde ise elle yapılmaktadır.

Senkron Jeneratörün Frekans-Aktif Güç, Gerilim-Reaktif Güç Karakteristikleri

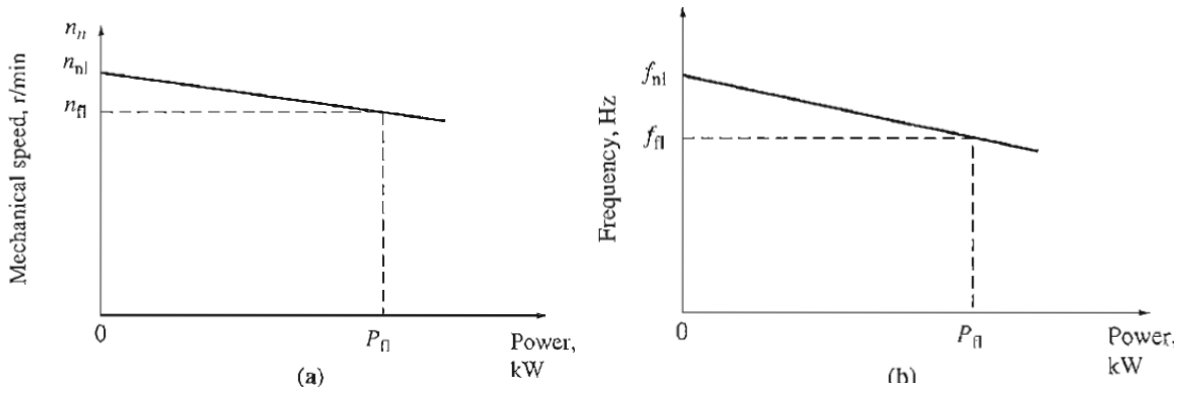
Tüm jeneratörler mekanik güç kaynağı olan bir tahrik makinesi tarafından döndürülürler. Güç kaynağından bağımsız olarak tüm tahrik sistemleri benzer şekilde davranma eğilimindedir-bunlar çekilen güç arttıkça, devir sayıları düşer. Hızdaki düşüş genel olarak doğrusal değildir, ancak güç talebindeki artışla hızdaki düşüşü doğrusal yapmak için genellikle bir tür ayar mekanizması olan hız regülatörü sisteme dahil edilir.

Regülatörün amacı yük artışı olduğunda hızın aniden değil yavaş bir şekilde düşmesini sağlamaktır;

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\% \quad HD = \frac{n_{yy} - n_{ty}}{n_{ty}} \times 100\% \quad (4-27)$$

n_{yy} : tahrik sisteminin yüksüz hızı, n_{ty} : tam yükteki hız değeridir.

HD'nin tipik değer aralığı; 2% – 4%.



Şekil 4-29. a) Tipik bir tahrik sistemi için hız-güç değişim eğrisi, b) Frekans-Güç değişim eğrisi

Çoğu hız regülatörü, türbinin yüksüz hızının değiştirilmesine izin vermek için bir tür ayar noktası mekanizmasına sahiptir.

Tipik hız-güç değişim eğrisi Şekil 4-29a'da verilmiştir. Jeneratörün mil hız değeri elektriksel frekans değeri ile aşağıdaki gibi ilişkilidir;

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120}$$

Frekans ile aktif güç arasındaki değişim aşağıdaki eşitlik ile verilebilir;

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sys}) \quad P = e_e (f_{yy} - f_{sys})$$

P = çıkış gücü

f_{nl} = jeneratörün yüksüz hızı

f_{sys} = sistemin çalışma frekansı

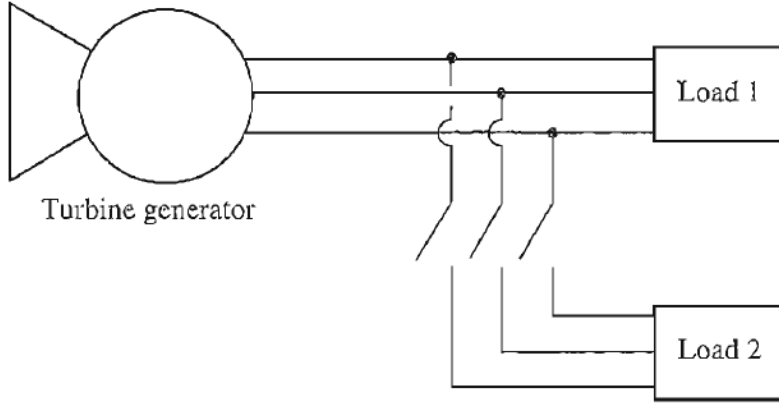
s_p = eğrinin eğimi, kW/Hz veya MW/Hz

Frekans ile aktif güç arasında olan ilişkiye benzer bir durum, reaktif güç ile VT jeneratör uç gerilimi arasında da vardır. Daha önce de açıklandığı gibi, senkron jeneratör endüktif yükü beslediğinde uç gerilimi azalır, kapasitif yükü beslediğinde ise uç gerilimi artmaktadır.

Problem 5-5

Aşağıdaki şekilde bir jeneratör bir yükü beslemektedir. İkinci bir yük, birinci yüke paralel olarak bağlanacaktır. Jeneratörün yüksüz frekans değeri 61 Hz ve e_e eğim değeri 1 MW/Hz dir. 1 numaralı yük, 1000 kW, GF=0.8 (geri), 2 numaralı yük 800 kW, GF=0.707 (geri) değerindedir.

- Anahtar kapatılmadan önce sistem frekansı nedir?
- 2 numaralı yük devreye alındıktan sonra sistem frekansı ne olur?
- 2 numaralı yük devreye alındıktan sonra sistem frekansını 60 Hz'e döndürmek için hangi işlem yapılabilir?



Şekil 4-31. Problem 4-5'e ait güç sistemi

Çözüm:

Jeneratör karakteristiğinin eğimi 1 MW/Hz dir. Yüksüz freans değeri $f_{yy}=61$ Hz dir. Bu yüzden jeneratör tarafından üretilen aktif güç değeri;

$$P = s_p(f_{nl} - f_{sys})$$

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p}$$

- Sistem frekansı başlangıçta

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p}$$

$$= 61 \text{ Hz} - \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW/Hz}} = 61 \text{ Hz} - 1 \text{ Hz} = 60 \text{ Hz}$$

- 2 numaralı yük bağlandıktan sonra sistem frekansı aşağıdaki değeri alır;

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p}$$

$$= 61 \text{ Hz} - \frac{1800 \text{ kW}}{1 \text{ MW/Hz}} = 61 \text{ Hz} - 1.8 \text{ Hz} = 59.2 \text{ Hz}$$

- Yük bağlandıktan sonra sistem frekansı 59,2 Hz e düşer. Bu frekansı 60 Hz e yükseltmek için hız regülatörünün (Şekil 4-29b) frekans ayar değerlerini 0.8 Hz arttırarak $f_{yy}=61.8$ Hz yapmak gerekir. Bu yapıldığında sistem frekansı 60 Hz olacaktır.

Sonuç olarak bir jeneratör tek başına bir yükü besliyorsa;

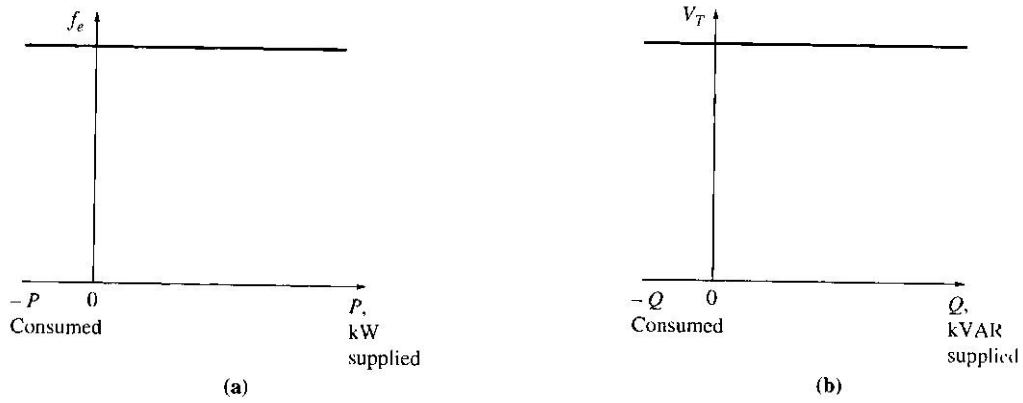
- Jeneratörün ürettiği P ve Q güç değerleri müşterinin talep ettiği güç değeri olacaktır

- b) Verilen bir aktif güç için, hız regülatörünün ayar değerleri sistemin çalışma frekansını kontrol eder
- c) Verilen bir reaktif güç için, alan sargısının (veya alan regülatörünün ayar noktaları) güç sisteminin gerilim değerini kontrol eder.

Jeneratörlerin Büyük Güçlü Bir Sisteme Paralel Bağlı Olarak Çalışması

Büyük güç sistemlerinde bir jeneratördeki değişim, sistem üzerinde herhangi bir etkiye sebep olmaz

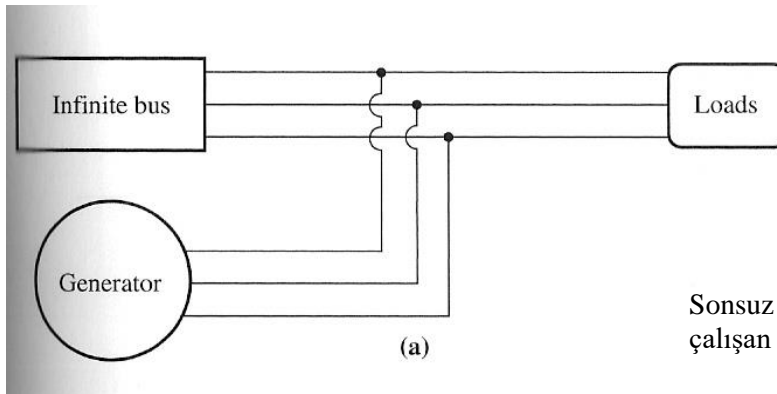
Büyük güç sistemi “sonsuz bara” olarak isimlendirilmektedir. Sonsuz bara öyle güçlü bir sistemdir ki, ona ne kadar aktif veya reaktif güç verilse ya da ondan çekilse, onun gerilim ve frekans değeri değişmez. Böyle bir sistemin güç-frekans özelliği ve reaktif güç-gerilim özelliği Şekil 4-32’de gösterilmektedir;



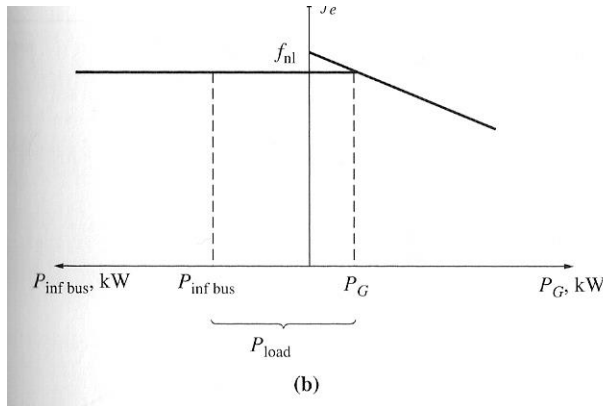
Şekil 4-32. Sonsuz güçlü bara eğrileri a) Frekans-aktif güç eğrisi, b) Gerilim-reaktif güç eğrisi

Bu kadar güçlü bir sisteme bağlı bir jeneratörün davranışını anlamak için, bir adet jeneratör ve sonsuz bara içeren bir sistemin bir yükü beslediği bir senaryoyu inceleyelim. Jeneratörün tahrik sisteminin bir hız regülatörüne sahip olduğunu kabul edelim. Jeneratör alan akım değerinin alan devresine seri bağlı bir reostanın el ile kontrol edilerek ayarlandığını varsayalım. Alan akımının değişim etkisini daha kolay analiz etmek için otomatik alan akımı kontrol sisteminin varlığını görmezden geleceğiz. Böyle bir sistem Şekil 4-33.a’da gösterilmektedir.

Bir jeneratör başka bir jeneratöre veya büyük bir sisteme paralel olarak bağlandığında, çıkış iletkenlerinin birbirlerine bağlı olması nedeniyle, tüm makinelerin frekans ve uç gerilim değerleri aynı olmalıdır. Bu nedenle, aktif güç frekans karakteristiği ve reaktif güç-gerilim karakteristiği ortak dikey bir eksen üzerinde sırt sırta çizilebilir (Şekil 4-33b’de gösterildiği gibi)



Sonsuz baraya paralel bağlı olarak çalışan bir senkron jeneratör



Sonsuz baraya paralel bağı olarak çalışan bir senkron jeneratöre ilişkin frekans-güç karakteristiği (veya ev diyagramı)

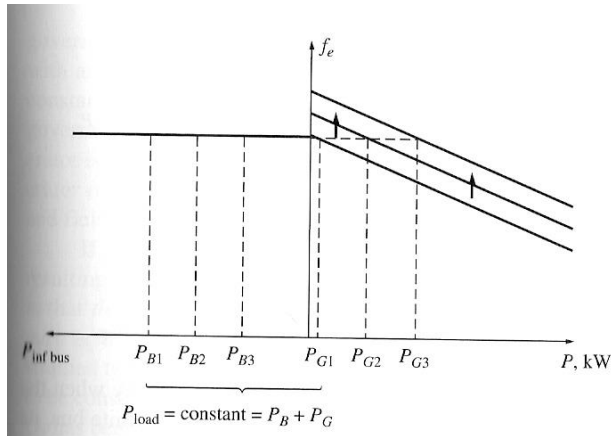
Şekil 4-33.

Sonuç olarak eğer bir jeneratör sonsuz güçlü bir baraya paralel bağı olarak çalışıyorsa, aşağıdaki açıklamalar geçerli olacaktır;

1. Jeneratör sisteme bağı ise jeneratörün frekans ve uç gerilim değeri güç sistemi tarafından kontrol edilir.
2. Jeneratörün hız regülatörünün ayar noktaları, jeneratör tarafından güç sistemine verilen aktif güç değerini kontrol eder.
3. Jeneratörün alan akımı, jeneratör tarafından güç sistemine verilen reaktif güç değerini kontrol eder.

Governor Control Effects:

In theory, if the governor set points is increased, the no load frequency will also increase (the droop graph will shift up). Since in an infinite bus system frequency does not change, the overall effect is to increase the generator output power (another way to explain that it would look as if the generator is loaded up further). Hence the output current will increase.



The effect of increasing the governor's set point on the house diagram

The effect of increasing the governor's set point on the phasor diagram

Notice that in the phasor diagram that $E_A \sin \delta$ (which is proportional to the power supplied as long as V_T is constant) has increased, while the magnitude of $E_A (=K\phi\omega)$ remains constant, since both the field current I_F and the speed of rotation ω is unchanged. As the governor set points are further increased the no-load frequency increases and the power supplied by the generator increases. As the power output increases, E_A remains at constant magnitude while $E_A \sin \delta$ is further increased.

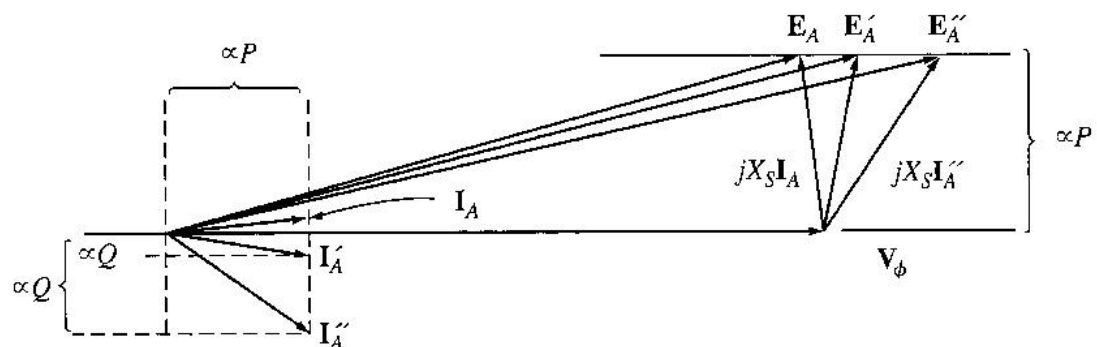
If the governor is set as such that it exceeds the load requirement, the excess power will flow back to the infinite bus system. The infinite bus, by definition, can supply or consume any amount of power without a change in frequency, so the extra power is consumed.

Field Current Control Effects:

Increasing the governor set point will increase power but will cause the generator to absorb some reactive power. The question is now, how do we supply reactive power Q into the system instead of absorbing it? This can be done by adjusting the field current of the generator.

Constraints: Power into the generator must remain constant when I_F is changed so that power out of the generator must also remain constant. The power into a generator is given by the equation $P_{in} = \tau_{ind}\omega_m$. Now, the prime mover of a synchronous generator has a fixed-torque speed characteristic for any given governor setting. This curve changes only when the governor set points are changed. Since the generator is tied to an infinite bus, its speed cannot change. If the generator's speed does not change and the governor set points have not been changed, the power supplied by the generator must remain constant.

If the power supplied is constant as the field current is changed, then the distances proportional to the power in the phasor diagram ($I_A \cos \theta$ and $E_A \sin \delta$) cannot change. When the field current is increased, the flux ϕ increases, and therefore $E_A (=K\phi\omega)$ increases. If E_A increases, but $E_A \sin \delta$ must remain constant, then the phasor E_A must "slide" along the line of constant power, as shown below.



The effect of increasing the generator's field current on the phasor diagram of the machine. Since V_ϕ is constant, the angle of $jX_s I_A$ changes as shown, and therefore the angle and magnitude of I_A change. Notice that as a result the distance proportional to Q ($I_A \sin \theta$) increases.

In other words, increasing the field current in a synchronous generator operating in parallel with an infinite bus increases the reactive power output of the generator.

Hence, for a generator operating in parallel with an infinite bus:

- a) **Frequency and terminal voltage of generator is controlled by the connected system.**
- b) **Changes in Governor set points will control real power to be supplied.**
- c) **Changes in Field Current will control the amount of reactive power to be supplied.**

Note that these effects are only applicable for generators in a large system only.

Operation of Generators in Parallel with Other Generators of the Same Size

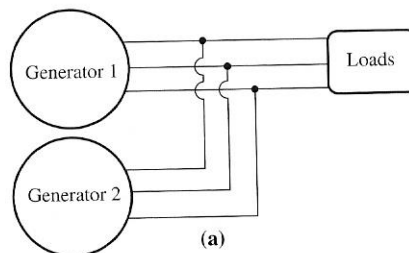
When a single generator operated alone, the real and reactive powers supplied by the generators are fixed, constrained to be equal to the power demanded by the load, and the frequency and terminal voltage were varied by the governor set points and the field current.

When a generator is operating in parallel with an infinite bus, the frequency and terminal voltage were constrained to be constant by the infinite bus, and the real and reactive powers were varied by the governor set points and the field current.

What happens when a synchronous generator is connected in parallel not with an infinite bus, but rather with another generator of the same size?

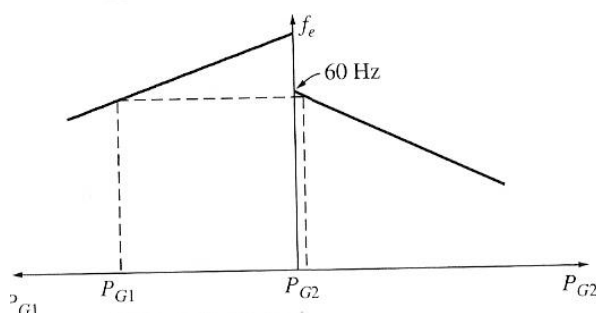
What will be the effect of changing governor set points and field currents?

The system is as shown here:



In this system, the basic constraint is that the sum of the real and reactive powers supplied by the two generators must equal the P and Q demanded by the load. The system frequency is not constrained to be constant, and neither is the power of a given generator constrained to be constant.

The power-frequency diagram for such a system immediately after G_2 has been paralleled to the line is shown below:



The house diagram at the moment G_2 is paralleled with the system

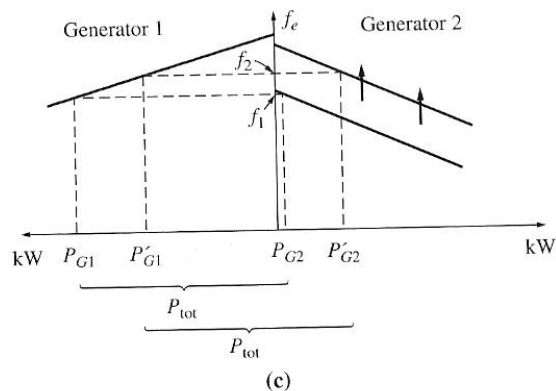
The total power P_{tot} (which is equal to P_{load}) and reactive power respectively are given by:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{load}} = P_{G1} + P_{G2}$$

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{load}} = Q_{G1} + Q_{G2}$$

What happens if the governor set points of G_2 are increased?

As a result, the power-frequency curve of G_2 shifts upward as shown here:



The effect of increasing G_2 's governor set points on the operation of the system.

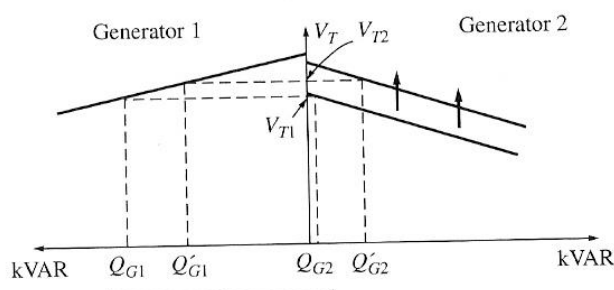
The total power supplied to the load must not change. At the original frequency f_1 , the power supplied by G_1 and G_2 will now be larger than the load demand, so the system cannot continue to operate at the same frequency as before. In fact, there is only one frequency at which the sum of the powers out of the two generators is equal to P_{load} . That frequency f_2 is higher than the original system operating frequency. At that frequency, G_2 supplies more power than before, and G_1 supplies less power than before.

Thus, when 2 generators are operating together, an increase in governor set points on one of them

4. increases the system frequency.
5. increases the power supplied by that generator, while reducing the power supplied by the other one.

What happens if the field current of G_2 is increased?

The resulting behaviour is analogous to the real-power situation as shown below:



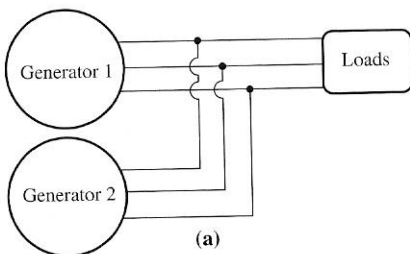
The effect of increasing G_2 's field current on the operating of the system.

When 2 generators are operating together and the field current of G_2 is increased,

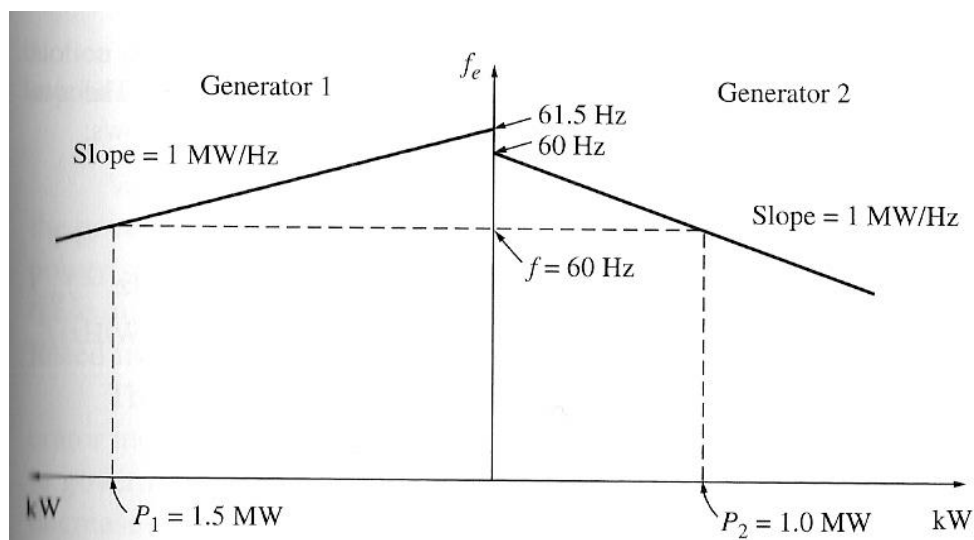
1. The system terminal voltage is increased.
2. The reactive power Q supplied by that generator is increased, while the reactive power supplied by the other generator is decreased.

If the slopes and no-load frequencies of the generator's speed droop (frequency-power) curves are known, then the powers supplied by each generator and the resulting system frequency can be determined quantitatively. Example 5-6 shows how this can be done.

Example 5-6



G_1 has a no-load frequency of 61.5 Hz and a slope S_{P1} of 1 MW/Hz. G_2 has a no-load frequency of 61 Hz and a slope S_{P1} of 1 MW/Hz. The 2 generators are supplying a real load totalling 2.5 MW at 0.8 PF lagging. The resulting system power-frequency or house diagram is shown below.

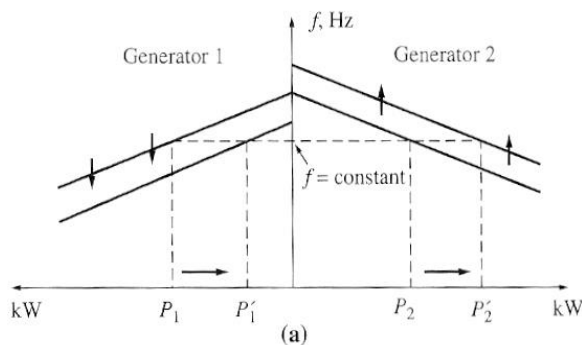


- At what frequency is this system operating, and how much power is supplied by each of the 2 generators?
- Suppose an additional 1-MW load were attached to this power system. What would the new system frequency be, and how much power would G_1 and G_2 supply now?
- With the system in the configuration described in part b, what will the system frequency and generator powers be if the governor set points on G_2 are increased by 0.5 Hz?

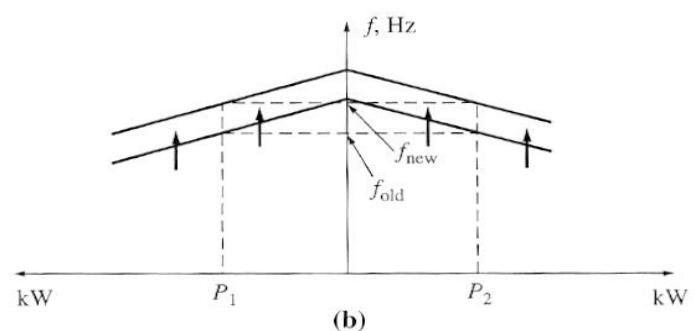
When 2 generators of similar size are operating in parallel, a change in the governor set points of one of them changes both the system freq and the power sharing between them.

How can the power sharing of the power system be adjusted independently of the system frequency, and vice versa?

An increase in governor set points on one generator increases that machine's power and increases the system frequency. A decrease in governor set points on the other generator decreases that machine's power and decreases the system frequency. Therefore, to adjust power sharing without changing the system frequency, increase the governor set points of one generator and simultaneously decrease the governor set points of the other generator. (and same goes when adjusting the system frequency). This is shown below:

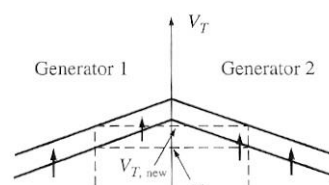


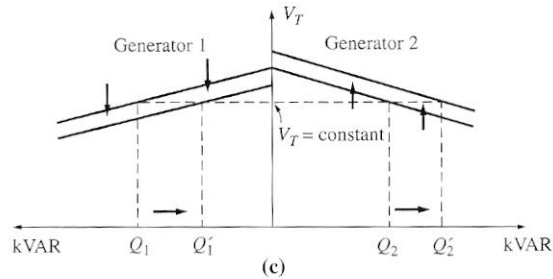
Shifting power sharing without affecting system frequency



Shifting system frequency without affecting power sharing

Reactive power and terminal voltage adjustment work in an analogous fashion. To shift the reactive power sharing without changing V_T , simultaneously increase the field current on one generator and decrease the field current on the other. (and same goes when adjusting the terminal voltage). This is shown below:

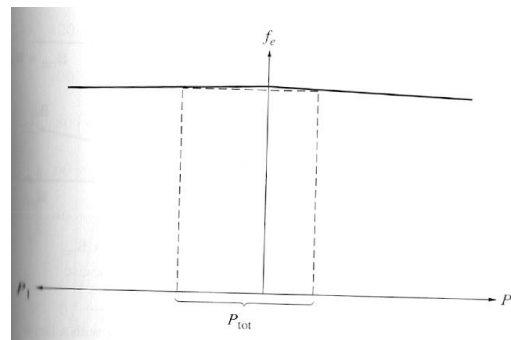




Shifting reactive power sharing without affecting terminal voltage

Shifting terminal voltage without affecting reactive power sharing

It is very important that any synchronous generator intended to operate in parallel with other machines have a drooping frequency-power characteristic. If two generators have flat or nearly flat characteristics, then the power sharing between them can vary widely with only the tiniest changes in no-load speed. This problem is illustrated below:



Notice that even very tiny changes in f_{nl} in one of the generators would cause wild shifts in power sharing. To ensure good control of power sharing between generators, they should have speed droops in the range of 2-5%.

10. Synchronous Generator Ratings

The Voltage, Speed and Frequency Ratings

Frequency Ratings: Rated frequency will depend upon the system at which the generator is connected.

Voltage Ratings: Generated voltage is dependent upon flux, speed of rotation and mechanical constants. However, there is a ceiling limit of flux level since it is dependent upon the generator material. Hence voltage ratings may give a rough idea on its maximum flux level possible and also maximum voltage to before the winding insulation breaks down.

Apparent Power and Power Factor Ratings

Constraints for electrical machines generally dependent upon mechanical strength (mechanical torque on the shaft of the machine) and also its winding insulation limits (heating of its windings). For a generator, there are 2 different windings that has to be protected which are:

- a) Armature winding
- b) Field Winding

Hence the maximum armature current flow can be found from the maximum apparent power, S :

$$S = 3V_{\phi} I_A$$

If the rated voltage is known, we may find the maximum I_A allowed.

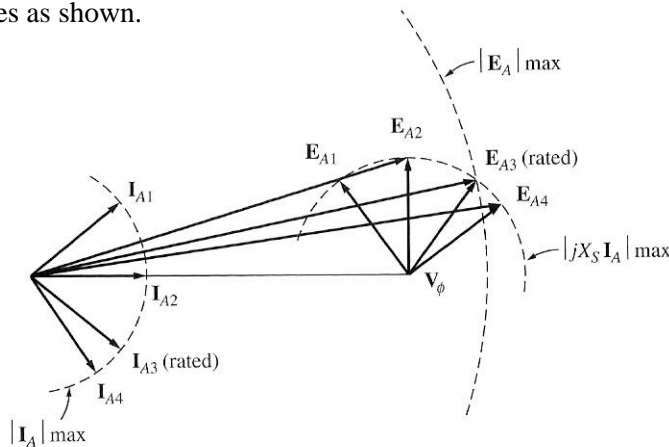
The heating effect of the stator copper losses is given by:

$$P_{SCL} = 3 I_A^2 R_A$$

The field copper losses:

$$P_{RCL} = I_F^2 R_F$$

Maximum field current will set the maximum E_A permissible. And since we can find the maximum field current and the maximum E_A possible, we may be able to determine the lowest PF changes possible for the generator to operate at rated apparent power. Figure below shows the phasor diagram of a synchronous generator with the rated voltage and armature current. The current can assume many different angles as shown.



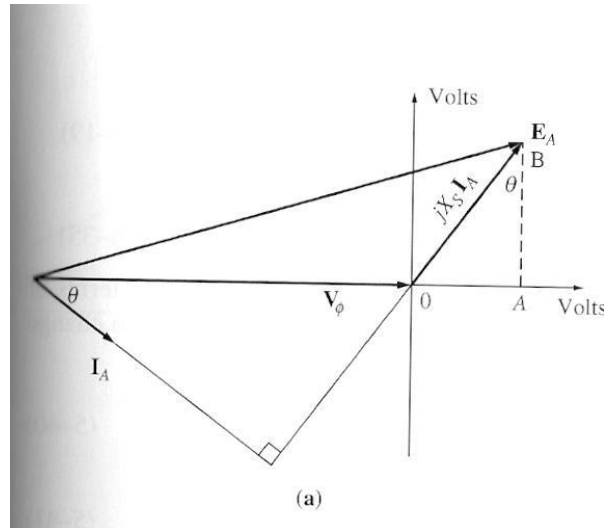
The internal generated voltage E_A is the sum of V_{ϕ} and $jX_s I_A$. Notice that for some possible current angles the required E_A exceeds $E_{A,\max}$. If the generator were operated at the rated armature current and these power factors, the field winding would burn up.

The angle of I_A that requires the max possible E_A while V_{ϕ} remains at the rated value gives the rated power factor of the generator. It is possible to operate the generator at a lower (more lagging) power factor than the rated value, but only by cutting back on the kVA supplied by the generator.

Synchronous Generator Capability Curves.

Based upon these limits, there is a need to plot the capability of the synchronous generator. This is so that it can be shown graphically the limits of the generator.

A capability diagram is a plot of complex power $S=P+jQ$. The capability curve can be derived back from the voltage phasor of the synchronous generator. Assume that a voltage phasor as shown, operating at lagging power factor and its rated value:



Note that the capability curve of the must represent power limits of the generator, hence there is a need to convert the **voltage phasor** into **power phasor**.

The powers are given by:

$$P = 3 V\phi I_A \cos \theta$$

$$Q = 3 V\phi I_A \sin \theta$$

$$S = 3 V\phi I_A$$

Thus,

The conversion factor to change the scale of the axes from V to VA is $3 V\phi/X_s$.

On the voltage axes, the origin of the phasor diagram is at $-V\phi$ on the horizontal axis, so the origin on the power diagram is at:

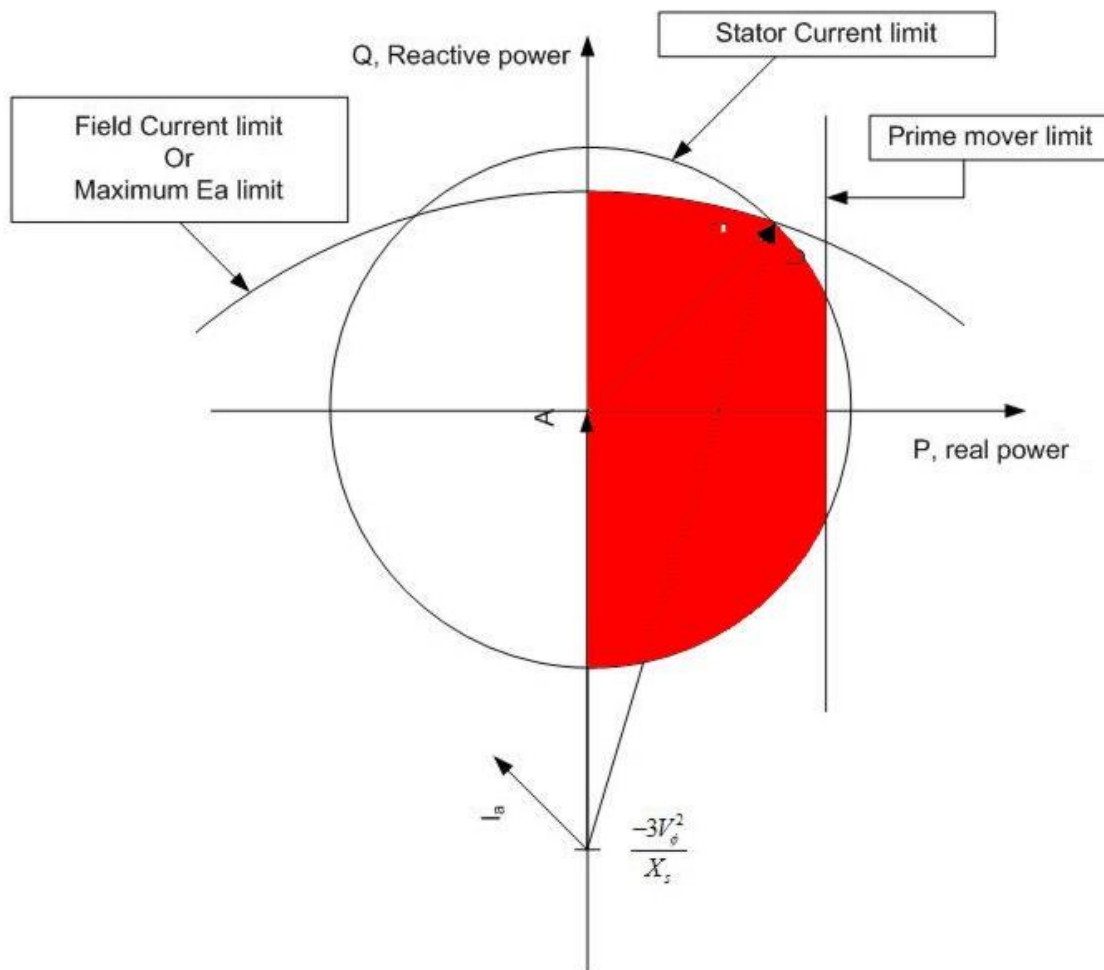
$$Q = \frac{3V_\phi}{X_s}(-V_\phi) = -\frac{3V_\phi^2}{X_s}$$

The field current is proportional to the machine's flux, and the flux is proportional to $E_A = K\phi\omega$. The length corresponding to E_A on the power diagram is:

$$D_E = \frac{3E_A V_\phi}{X_s}$$

The armature current I_A is proportional to $X_s I_A$, and the length corresponding to $X_s I_A$ on the power diagram is $3V\phi I_A$.

The final capability curve is shown below:



It is a plot of P vs Q. Lines of constant armature current I_A appear as lines of constant $S = 3V\phi I_A$, which are concentric circles around the origin. Lines of constant field current correspond to lines of constant E_A , which are shown as circles of magnitude $3E_A V_\phi / X_s$ centered on the point

$$Q = -\frac{3V_\phi^2}{X_s}$$

The armature current limit appears as the circle corresponding to the rated I_A or rated KVA, and the field current limit appears as a circle corresponding to the rated I_F or E_A . Any point that lies within both circles is a safe operating point for the generator.

Example 5-8

A 480V, 50 Hz, Y-connected, 6-pole, synchronous generator is rated at 50kVA at 0.8 PF lagging. It has a synchronous reactance of 1 ohm per phase. Assume that this generator is connected to a steam turbine capable of supplying up to 45 kW. The friction and windage losses are 1.5 kW, and the core losses are 1.0 kW.

- (a) Sketch the capability curve for this generator, including the prime mover power limit.
- (b) Can this generator supply a line current of 56A at 0.7 PF lagging? Why or why not?
- (c) What is the max amount of reactive power this generator can produce?
- (d) If the generator supplies 30kW of real power, what is the maximum amount of reactive power that can be simultaneously supplied?