

üreteçlerde işletme kararlılığı

NİHAT TAYLAN

UDK: 621.3.072:621.313.3

ÖZET.

Yazıda üreteç vektör diyagramlarından yararlanılarak kuramsal ve pratik işletme kararlılığı eğrilerinin elde edilme yöntemi anlatılmaktadır.

SUMMARY

The article describes a method of obtaining theoretical and practical operating stability characteristics from the generator vector diagrams.

Sanayide elektrik enerjisi kesintilerinin yarattığı kayıplar ve enerji yakıt maliyetlerinin giderek artması, santrallardaki üreteçlerin daha güvenilir, daha verimli ve daha bilinçli işletilmesini zorunlu kılmaktadır. On ya da onbeş yıl öncelerine kadar enerji üretim grupları küçük güçlerde ve sanayi, şehir merkezlerine yakın bölgelerde idiler. Bu durumda kararlılık, kapasitif yüklenme tehlikeli bir sorun olmuyordu; ayrıca o zamanki kısa hatlarda doğal güçten oldukça farklı güçler iletmekte kritik durumlar yaratmıyordu.

Uzun ve yüksek gerilimli hatlar üzerinden sanayi bölgelerini besleyen büyük güçlerdeki üreteçlerin devreye girmesi, kararlı ve verimli bir işletme gereksinimini doğurmaktadır. Bunun için önce üreticinin işletme kararlılığı eğrilerini çıkarmak ya da bunları üreteç yapımcılarından istemek gerekir. Bu eğriler yardımı ile aşağıda saydıklarımızı kolayca bulabiliriz:

1. üreticinin her akım ve güç çarpanı ($\cos \phi$) için aktif ve reaktif güçler,
2. Stator ve rotor sargılarının tehlikeli ısınma sınırı yönünden üreticinin verebileceği maksimum güçler,
3. Sabit aktif güçlerde üreticinin endüktif ve kapasitif yükleri,
4. Sabit uyarılarda üreticinin aktif ve reaktif güçleri,
5. Her akım değerinin karşılığı olan uyarma akımı ve güç çarpanı değerleri,
6. Her akıma (yani güç değerine) karşılık olan kutup tekerleği açısı (θ),
7. İşletme kararlılığı eğrilerinden gidilerek $P = f(\theta)$ eğrilerinin çıkarılması ve dolayısı ile üreteç ve bağlı olduğu güç sisteminin statik ve dinamik kararlılığının etüdü; buna bağlı olarak sistemdeki röle ve kesicilerin açma zamanlarının bulunması, ileride sisteme eklenecek üreteçlerin uyarma hızlarının, atalet kitlelerinin (GB^2), üreteç ve sistem reaktanslarının, sisteme konacak seri kondansatör ve reaktörlerin saptanması.

-Senkron makinalarda işletme kararlılığı eğrisinin çizimi için Sayın Muzaffer Canay, Elektrik Mühendisliği dergisinin 1958 Eylül-Ekim sayısında zahir ve basit bir yol vermiştir. Biz burada gerekli irdelemeleri yapabilmek için literatürdeki alışılmış yolu izleyeceğiz.

Statik işletme kararlılığı eğrisi, senkron makinanın vektör diyagramından çıkarıldığı için önce senkron makinanın vektör diyagramı kuramını çok kısa ve basit bir biçimde ele alalım.

Çoğunlukla doğanın bir niteliği olarak su santralleri su düşülerinin bulunduğu sanayiden uzak dağlık bölgelerde kurulurlar ve uzaktaki endüstri bölgelerini yüksek gerilimli iletim hatları ile

Nihat Taylan, ESAS

beslerler, bu yüzden genellikle bu santraller için kararlılık bir sorundur. Su santrallerimde üreticiler çıkık kutuplu olduğu için, çizimi daha karmaşık olmasına rağmen çıkık kutuplu üreticiler vektör diyagramı üzerinde çalışmak gerekir. Zaten ilerde sonuçları özel durum olan yuvarlak rotorlu üreticilere de uygulayacağız.

Bilindiği gibi senkron makinanın statorunda birbirinden 120° kaydırılmış üç simetrik sargı, rotorunda ise doğru akımla beslenen bir uyarma sargısı vardır. Rotor ω açısal hızı ile dönerken uyarma sargılarından doğru akımı geçirilirse bir elektriksel alan doğar ve bu alanın kuvvet çizgileri stator sargılarından geçerek stator karkası üzerinden devresini tamamlar. Üreticiler boşta iken uyarma alanı sabit stator sargılarını kestiği halde, bu sargılardan bir akım akmaz çünkü sargı uçları açıktır. Bu sırada stator sargılarında endüklenen gerilime (EKK) başta çalışma gerilimi ya da kutup tekerleği gerilimi diyoruz. Bu gerilim rotorda belirli bir uyarma akımının karşılığıdır (Boşta çalışma uyarma akımı).

Endüklenen bu gerilim kutbun biçimine, stator sargı tipine, uyarma gücüne ve rotor dönme hızına bağlıdır. Uyarma alanının yarattığı kuvvet çizgilerinin tamamı stator sargılarına girmez, bir bölümü çıkık kutuplu makinalarda devresini hava aralığından tamamlayarak bir kutuptan diğerine geçer, turbo rotorda ise rotorun sargısız kısmındaki demirden geçerler.

Şimdi stator sargılarının yüklendiğini, yani üreticiler klemenslerine bir yük direncinin (örneğin, iletim hattı üzerindeki bir endüstri alıcısı) bağlandığını düşünelim; bu durumda stator sargılarından yüke bağlı bir akım geçecektir. Bu akım da stator sargılarında, uyarma alanını zayıflatıcı (kapasitif yüklerde kuvvetlendirici) etki göstererek, uyarma sargılarında akımlar ve masif demir bölümünde fuko akımları doğuran bir alternatif alan yaratır. Yük akımının bu etkisine "endüvi reaksiyonu" deniyor. Uyarma sargılarındaki endüvi reaksiyonunun etkisi ve yük akımının stator sargı dirençlerindeki gerilim düşümü nedeni ile üreticiler uçlarındaki gerilim uyarma artırılmadığı sürece boşta çalışma geriliminden (U_0) daha düşüktür.

Bilindiği gibi çıkık kutuplu makinalarda rotorla stator arasındaki hava aralığı rotor çevresi boyunca aynı değildir. Buna göre kutup ekseni doğrultusunda (boyuna eksen) yani kutup başı ile stator arasında manyetik direnç en az olduğu için burada rotora geçen endüvi reaksiyonunun akısı en çok buna karşılık iki kutup arasındaki hava aralığından ya da aynı anlamda, kutup ekseni dik doğrultuda (enine eksen) geçen endüvi reaksiyonunun akısı büyük hava aralığının manyetik direncini yenmek zorunda kaldığından en azdır. Bu durumu başka biçimde de açıklayabiliriz: Eğer üç fazlı stator sargılarından birini gözönüne alırsak, bunun ekseni ile kutup ekseni üst üste geldiği zaman hava aralığı en küçük, buna karşılık endüktivite (L_j) en büyük değerini alacak ve bu endüktivitenin karşılığı olan reaktans

($X_{ad} = \omega L_{j1}$) en büyük olacaktır. Buna karşılık, kutup ekseni sargı eksenine dik olursa, hava aralığı en büyük, dolayısı ile endüktivite (L_{j2}) en küçük ve bu endüktivitenin reaktans karşılığı da ($\omega L_{j2} = X_{q2}$) daha küçük olacaktır.

Bu reaktanslar stator kaçak reaktansı ile toplanırsa; boyuna ($X_d = X_{ad} + X_{1a}$) ve enine ($X_q = X_{q2} + X_{1a}$) senkron reaktanslar elde edilir.

Şimdi üreticiler klemenslerindeki gerilime (U) stator kaçak reaktansındaki gerilim düşümünü ($I X_{1a}$) akıma dik doğrultuda eklersek (direnç yok sayılıyor) hava aralığı gerilimini (bileşke gerilim ya da iç gerilim ya da esas alan gerilimi) E_f elde ederiz. Bu gerilimi, uyarma akısı ile endüvi reaksiyonu akısının 8° bileşke alanı (daha doğrusu vektörel toplam) doğurur. Bu alan yukarıda belirtildiği gibi, hava aralığının tekdüze (uniform) olmasından dolayı boyuna akımın yarattığı, boyuna alan E_d ile enine akımın yarattığı enine alan E_q bileşenlerine ayrılabilir. Boyuna alan uyarma alanı ile aynı fazda, enine alan ise uyarma alanından 90° kayıktır. Bu yüzden yeterli biçimde uyarma artırılarak boyuna bileşen kompanse edilebilir. Akımın aktif bölümünün yarattığı ve kompanse edilemeyen enine bileşen kutup tekerleği açısının doğmasına yol açar. Bu nedenle reaktif yükte yalnız boyuna bileşen akımı vardır. Hava aralığı alanı ilerde geçici durum çalışmasının açıklanmasında gerekli olacağı için ayrıntılı anlatıldı.

Şimdi vektör diyagramını tamamlamaya çalışalım; yine klemens gerilimine akıma dik doğrultuda $I X_q$ gerilim düşümünü eklersek, kutup tekerleği geriliminin doğrultusunu (04) buluruz. Yine U gerilimine akıma dik doğrultuda $I X_d$ gerilim düşümünü ekleyip (13) bulunan 3 noktasından 04 doğrultusuna dik inerek 02 uzunluğunu yani kutup tekerleği gerilimini (uyarma gerilimini) buluruz. Bunu başka yoldan da bulma olanağı var; I akımını boyuna ve enine doğrultularda bileşenlerine ayırır, sonra U gerilimine $I(jX_d)$ ve $I X_q$ gerilim düşümlerini geometrik olarak eklersek E kutup tekerleği gerilimini elde ederiz.

Diyagramda 53 uzunluğu $I q X_j$ 'ye ve dolayısı ile 23 de $I q(X_d - X_q)$ ye karşılıktır. Bu 23 uzunluğunu vardığı rotorun manyetik asimetrisinden (reaksiyon efekt) doğmaktadır. Eğer 3 noktasından E kutup tekerleği gerilimine (uyarma gerilimine) bir paralel çizilirse ordinat eksenini 6 noktasından keser, 06 çaplı dairede çapın değeri

$$06 = U \frac{X_d - X_q}{X_q} \text{ dür.}$$

Çünkü, 076 üçgeninde

$$06 = \frac{07}{\sin 6} = \frac{I q (X_d - X_q)}{\sin 6} \text{ olur,}$$

burada 190 üçgeninde

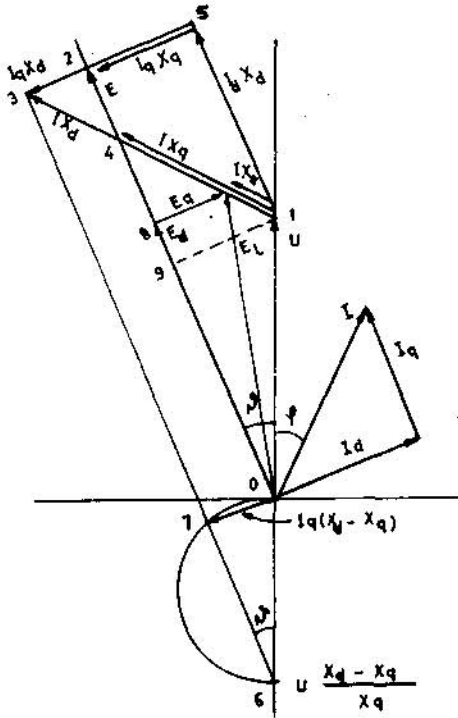
$$\sin 9 = \frac{07}{I R} = \frac{I_a X_a}{U}$$

değerini yukarıda yerine koyduğumuzda,

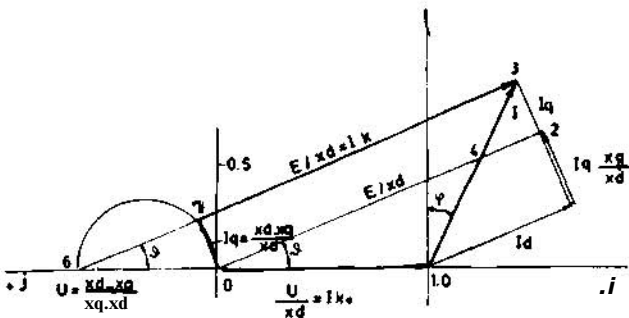
$$\overline{06} = U \frac{X_d - X_q}{X_q} \text{ çıkar.}$$

Ayrıca $37 = 20 = E$ dir.

Şimdi gerilim vektör diyagramından işletmeciye gerekli olan akım diyagramına geçmek için diyagramdaki bütün gerilim değerlerini senkron reaktansa bölümler ve diyagramı saat yönünde 90° çevirelim (yani bütün değerleri $1/jX(j)$ ile çarpalım). Böylece bulunan Şekil 2'de 1 noktasından çizilecek bir dikle yeni bir koordinat sistemi elde edilir ve bu sistemin ordinat eksenini ile a-



Şekil 1. Üreticinin gerilim vektör diyagramı.



Şekil 2. Üreticinin akım vektör diyagramı.

kir. vektörü arasında kalan açı, yük çarpanı açısını verir. Yeni koordinat sisteminde akımın ordinat üzerindeki bileşeni aktif, apsis üzerindeki ise reaktiftir.

Akım diyagramında anıra gerilim ve akım değerlerine karşılık olan 01 ve 13 uzunlukları 1 birim olarak alınırsa (birim başına, per unit), boşa çalışma kısa devre oranı;

$$\frac{I_{k0}}{I_n} = \frac{U/X_d}{I_n} = \frac{1/X_d}{\frac{1}{I_n}} = \frac{I_n}{X_d} \text{ olur,}$$

böylece çok önemli bir nitelik, yani 01 boşa çalışmadaki kısa devre oranının senkron reaktansla ters orantılı olduğu elde edilir. İlerde görüleceği gibi üreticinin baştaki kısa devre oranı, dolayısı ile senkron reaktansı besleyeceği şebekenin kapasitif yüküne göre seçilir.

Sabit kutup geriliminde ($U_n = 1$) 1 noktasındaki koordinat sistemi aynı zamanda aktif ve reaktif güç değerlerini verir, 13 akım değerinin ordinat eksenindeki bileşeni P_w aktif gücün yüzde değerini, apsis eksenindeki P^r ise reaktif gücün yüzde değerini verir.

Stator akımı sabit tutulur (örneğin $I_n = 1$) ve yük çarpanı ($\cos\phi$) değiştirilirse; I_n akım vektörünün (13) ucu 1 yarıçaplı daire çizer. Aynı şekilde;

$$\sqrt{3}V^4 - V^{2ve}$$

diğer akım değerleri için aynı merkezli daireler yardımı ile her yük haline ait aktif, reaktif güç değerleri, yük çarpanları ve kutup tekerleği açıları (6) bulunabilir. Anma akımının üzerindeki çıkma stator sargıları için tehlike doğuracağından $I_n = 1$ dairesi sınır dairesidir. Ayrıca firmalar imal ettikleri üreticileri için yarım saat ya da bir saat çalışmayı garanti ettikleri 1,15 I_n ya da 1,20 I_n sınır dairelerini de verirler.

Düşük güç çarpanlarında aşırı uyarmanın rotor sargılarında doğuracağı yüksek ısı, stator sargısı ısınmasından daha tehlikeli olduğu için rotor ısınma sınırının da belirtilmesi istenir. Buna göre sabit uyarma değerlerinin ($E/X, j$) oluşturduğu yer eğrilerini çizmek gerekir. Bunun için 6 noktası merkez 73 doğrusu sabit ve 7 noktası daima daire üzerinde olacak şekilde (yani uyarma sabit) 3 noktasının çizileceği yer eğrisi bir Arşimet lemniskatı'dır. Anma yükündeki uyarmanın karşılığı olan lemniskat rotor ısınma sınırını verir. Burada her bir sabit uyarma lemniskatını çizerken matematikten bilindiği gibi 73 sabit uzunluğundaki doğrunun (7) ucu daima reaksiyon dairesi üzerindedir. Yuvarlak rotorlu makinalarda $X, j = X_q$ olduğu için reaksiyon dairesi sıfır ve lemniskatlar da birer daire olacaktır.

Makinanın çalışma alanını tamamlayabilmek için üçüncü bir sınır eğrisine gerek vardır. Bu da üreticinin kararlı çalışma sınır eğrisidir. Bilindiği gibi makina,

$$J\ddot{\delta} + D\dot{\delta} + P\delta = 0$$

eşitsizliğinin mümkün olduğu bölgelerde; statik

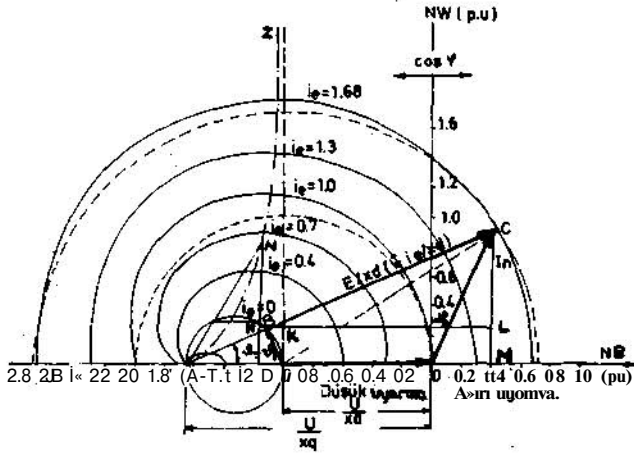
kararlı olarak çalışabilir. Maksimum güç değerlerini aşan yani

$$\frac{dP}{de} < 0$$

eşitsizliğine karşılık olan 6 değerlerinde makina kararlı değildir, o halde her bir sabit uyarma değerindeki Pascal lemniskatında maksimum P_w değerini veren (lemniskatın yatay teğet noktası) nokta

$$\frac{dP_w}{de} = 0$$

kararlılığın sınır noktasıdır. Farklı sabit uyar-



Şekil 3. Üretecin Lemniskat eğrileri.

ma lemniskatlarının bu noktalarını birleştiren eğri (Z) statik kararlılık sınır eğrisini verir. Lemniskatları çizmeden bu eğriyi çizmek mümkündür. A noktasından apsis eksenine ile herhangi bir 6 açısı yapan bir ışın çizilir, bu ışının reaksiyon dairesini kestiği noktadan çizilen yatay doğrunun yine reaksiyon dairesini kestiği H noktasından apsis eksenine indirilen dikin uzantısının 1-ışını kestiği N noktası kararlılık sınır eğrisine ait bir noktadır (kanıtı konuyu genişletmemesi için verilmemiştir). Böylece çeşitli ışınlarla ait bu noktalar birleştirilerek kararlılık eğrisi lemniskatlar çizilmeden elde edilmiş olur.

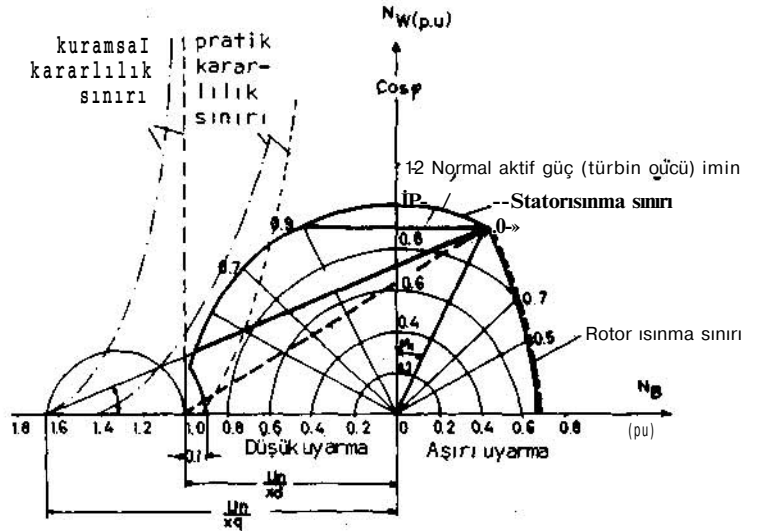
Uyarmanın reaksiyon dairesi üzerinde sıfır, dairenin içinde ise negatif (ya da karşı uyarma deniliyor) olduğu unutulmamalıdır. Dairenin yatay teğet noktası da (sıfır uyarımda maksimum P_w veren nokta) kararlılık eğrisine ait bir noktadır.

Şekilden görüleceği gibi eğer boşta çalışmadaki kısa devre oranı ($1/X_s$) birden büyük ise Z eğrisi stator ısınma dairesini kesmez, dolayısı ile stator ısınma dairesi içinde çalışılması gerektiğinden bu kararlılık eğrisinin önemi yoktur. Ancak işletme güvenliği yönünden kuramsal kararlılık eğrisinden (Z) yüzde on ya da onbeş daha sağda olan pratik kararlılık eğrisi (Z') esas alınır. Ayrıca yine işletme güvenliği gözetilerek stator ısınma sınır eğrisi sıfır uyarımda reaksiyon dairesinin yüzde on uzağından geçirilir.

Böylece aşağıda şekli verilen statik işletme eğrisi elde edilmiş olur.

Dikkat edilirse bu eğrinin çiziminde direnç ve doyma gözönüne alınmadığı gibi gerilim regülâtörünün değişken bir ayar yapmadığı, gerilimin el ile ya da kademeli ayar yapan bir regülâtör ile ayarlandığı kabul edildi. Direnç sonucu çok az etki ettiği ve çizimi çok karmaşıklaştırdığı i-

Şekil 4. Üretecin statik işletme eğrisi.



çin gözönüne alınmayabilir. Doymuş reaktans değerleri ile çıkarılan eğriler de bizim için kritik durum yaratmaz, çünkü kararlılık için kritik olan düşük uyarma alanıdır ve düşük uyarda da doyma rol oynamaz. Seri ve değişken çalışan uyarma sisteminin etkisini ilerde göreceğiz. Hızlı ve değişken çalışan bir uyarma sistemi ile kararlılık sınırının belirli bir değer üstünde de kararlı çalışılabilir.

Sabit uyarda üretcin aktif gücü artırılırsa, örneğin C işletme noktası sabit uyarma ($I_e = 1,68$ pu) lemniskatı üzerinde yükseltirse kutup tekerleği açısı δ ve stator akımı büyür, ancak güç çarpanı $\cos \delta$!, l'e doğru yaklaşır. C noktası lemniskat üzerinde daha da yükseltirse güç çarpanı ordinat ekseninin soluna yani düşük uyarma alanına geçer; bu durumda üretç endüktif güç yerine kapasitif güç verir.

Şimdi Şekil 3'de I_w aktif akımı, yani C noktasının ordinat eksenindeki bileşenini (CM) hesaplamak için önce CBL üçgeninde \overline{CL} kenarını

$$(CL = \frac{X_d - X_q}{X_d} \sin \delta)$$

ve buna ek olarak \overline{LK} yani \overline{KD} yi hesaplayıp toplarız. Burada KDB üçgeninde kenarları birbirine dik açılardan eşitliğinden

$$KD = I_q \frac{X_d - X_q}{X_d} \cos \delta$$

çıkır. Buna göre I_w değeri:

$$I_w = \frac{E}{X_d} \sin \delta + I_q \frac{X_d - X_q}{X_d} \cos \delta$$

Şimdi ABD dik üçgeninde $\sin \delta = BD/AD$ bağıntısını yazabiliriz, buradan $BD = AD \sin \delta$ olur. Değerleri yerine koyduğumuzda;

$$I_q \frac{X_d - X_q}{X_d} = \frac{U}{X_d} \frac{X_d - X_q}{X_d} \sin \delta$$

Bu değer yukardaki denklemde yerine konur ve $\sin \delta \cos \delta = \sin 2\delta$ trigonometrik bağıntısı gözönüne alınırsa;

$$I_w = \frac{E}{X_d} \sin \delta + \frac{U}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta \quad (D)$$

Buradan üretcin verdiği aktif güç P_w

$$P_w = I_w U = \frac{EU}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta \quad (2)$$

olur.

Böylece meşhur kararlılık denklemi elde edilmiş oldu. Aynı yoldan gidilerek reaktif akım ve reaktif güç- denklemleri bulunabilir.

$$I_h = \frac{U}{X_d} \cos \delta - \left(\frac{U}{X_d} + \frac{U}{X_d} \frac{X_d - X_q}{X_d} \sin^2 \delta \right) \quad (3)$$

$$P_b = \frac{EU}{X_d} \cos \delta - \left(\frac{U^2}{X_d} + \frac{U^2}{X_d} \frac{X_d - X_q}{X_d} \sin^2 \delta \right) \quad (4)$$

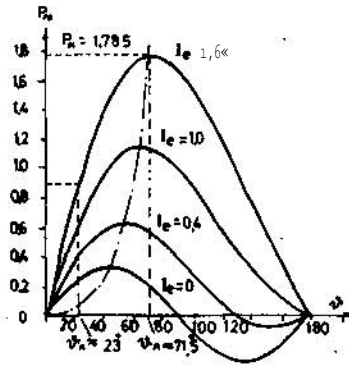
Yuvarlak rotorlu makinalarda $X_d = X_q$ olduğu için aynı denklemler aşağıdaki biçimi alır:

$$P_w = -f \sin \delta \quad (5)$$

$$P_b = -\frac{U}{j} \cos \delta - \frac{U^2}{2} \quad (6)$$

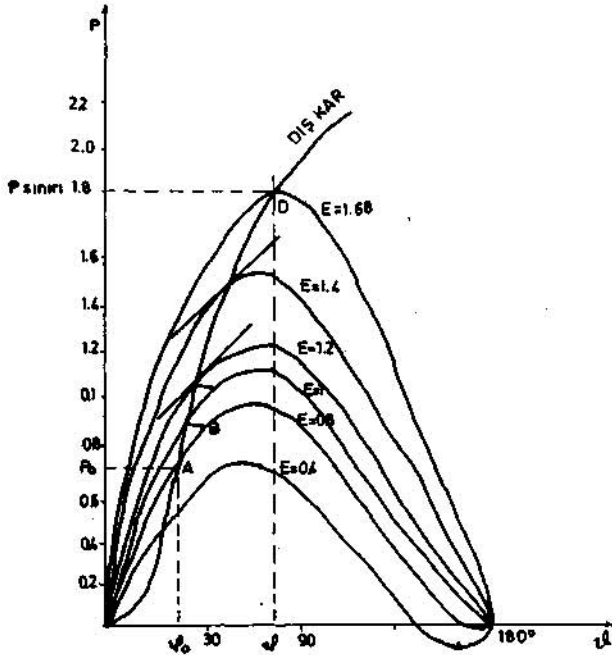
Kararlık çalışmalarının esasını oluşturan sabit uyarda $P = f(\delta)$ eğrisini çıkarmak için 1 nolu denklemde δ 'ya çeşitli açı değerleri vererek P_w değerlerini bulmak gerekir. Bu işlemin farklı sabit uyarma değerleri için yapmanın ne kadar yorucu olacağı görülüyor. Halbuki işletme eğrilerinden yararlanılarak bu eğrileri çıkarmak çok kolaydır; örneğin Şekil 3'de $I_e = 1,68$ pu sabit uyarma lemniskatı üzerinde çeşitli C işletme noktalarının karşılığı olan P_w ve δ açısını ölçüp ve Z kararlılık eğrisinin lemniskatı kestiği noktaya ait maksimum P_w ve δ değerlerini de bulur ve bu değerleri ordinatı P_w ve apsisi δ olan bir eksen sistemine taşırsak aradığımız eğri kolaylıkla çizilmiş olur. Aynı eğriler çeşitli sabit uyarma değerleri (örneğin $I_e = 1, I_e = 0,4, I_e = 0$ vb.) için de çizilerek, uyardı artırmak ya da azaltmakla kararlılık durumunun nasıl değiştiği kolaylıkla görülebilir. Yine bu eğrilerden çıkık kutuplu makinalarda maksimum güçteki δ kutup tekerleği açılarının reaksiyon etkisinden dolayı 90° den küçük olduğu görülüyor; halbuki yuvarlak rotorlu makinalarda çeşitli sabit uyarda maksimum güç karşılık olan açılardan 90° olduğu bilinmektedir.

$P = f(\delta)$ eğrileri üzerinde işletme noktalarına ait teğetler pozitif ($dP/d\delta > 0$) olduğu sürece işletme kararlıdır; teğetin $dP/d\delta = 0$ değerini aldığı nokta üretcin sabit uyarda verebileceği maksimum kararlı güçtür. Bu güçteki kutup tekerleği açısı yukarıda belirtildiği gibi δ_{max} olup yuvarlak rotorluda $\delta_{max} = 90^\circ$ olur. Eğrinin düşüş tarafında işletme noktalarına ait teğetler negatif değer aldığından, buralarda işletme olanağı vardır. Üretcin şebekeye vereceği gücü artırmak istersek türbinin



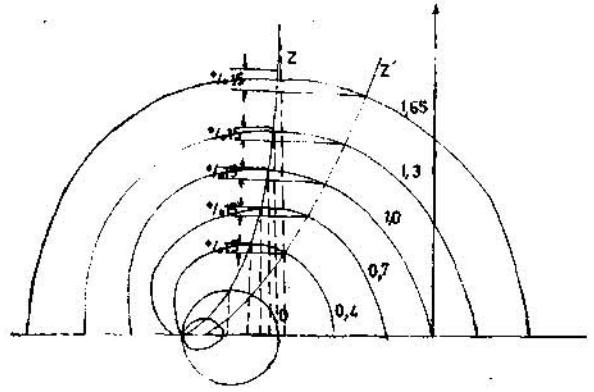
Şekil 5. Üreteçte çıkış gücünün kutup tekerleği açısı ve uyarma değerlerine göre değişimi.

tahrik gücünü artırmak gerekir, bu sırada uyarma sabit tutulursa üreteç çıkış gerilimi düşecektir; gerilimi eski, sabit defterine getirmek için uyarıyı artırmak gerekecek, dolayısı ile Şekil 6'da görüldüğü gibi bir üst esriye geçilmiş olacaktır. Zaten (2) denkleminde payda bulunan uyarma değeri E'yi artırmakla P_w kararlı pC'nün artacağı kolaylıkla görülebilir (bu sıradaki türbin tahrik gücü yeterli kabul ediliyor). Daha evvelcede belirtildiği gibi uyarma rotor ısınmasından ötürü anma yükteki uyarma değerinden daha yukarı çıkarılamaz, örneğin üreteç % 70 yükte çalışırken, $E = 0,8$ uyarma eğrisi üzerindeki işletme noktası A (P_0, e_0) olsun, şebekeye daha fazla güç vermek için türbin tahrik gücünü artırmak gerekir, bu anda türbin tahrik gücü üreticinin verdiği elektriksel güçten fazla olduğu için fark güç bir işleme doğurarak işletme noktasını eğri üzerinde B noktasına yükseltir, bu sırada α açısı büyür, gerilim düşer. Gerilimi eski değerine getirmek için uyarma akımı artırılır (örneğin $E = 1,0$ yapılır), bunun sonucu işletme noktası ikinci eğride C noktasına atlar ve bu noktaya ait α açısı da küçülmüş olur. Böylece tahrik gücü artırılırken gerilimi sabit tutacak biçimde uyarma devamlı artırılırsa işletme noktası daha dik seyreden AD eğrisi (dış karakteristik eğrisi) üzerinde yükselir (Bak: Elektrik Mühendisliği, S:154, İkaz Hızının Stabilitete Tesiri).



$P_0 = 0,70 P_n$
 Anma yükündeki uyarma $E=1,68$
 Anma yük uyarmasında maksimum kararlı güç $P_{s1} = \frac{1}{n} \cdot 1,8 P_n$

Şekil 6. Üreteç işletme noktasının uyarma değerlerine göre değişimi.



Şekil 7. Kuramsal kararlılık eğrisinden pratik kararlılık eğrisinin çıkartılması.

Dış karakteristiğin anma yükündeki uyarma eğrisini kestiği D noktası üreticinin kararlı sınır gücünü verir, çünkü bu noktada teğetin eğimi pozitifdir.

Çok yüksek hızlı regülatörlerle ve özel tertiplerle bu sınır biraz daha artırılabilir (yapay kararlılık).

Biz konumuz olan işletmenin statik kararlılık eğrisini çıkarırken gerilimin el ile ya da kademeli ayar yapan bir regülatör ile ayar edildiğini var saymıştık, yoksa bu eğrinin elde edilişi çok karmaşıktır; yalnız değişken ayar yapan seri bir regülatör ile Z kararlılık eğrisinin biraz dışında da kararlı çalışma mümkündür. Mecbur kalınmadıkça bu bölgede çalışılmamalıdır, çünkü böyle bir çalışmada regülatör arızalanırsa üreticinin devreden çıkması kaçınılmazdır.

Üreticinin bir trafo üzerinden uzun bir tek devre ya da çift devre hatla sonsuz bir şebekeyi beslemesi halinde de işletme kararlılığı eğrileri çıkarılabilir. Bu durumda trafo ve hat empedansları üreticinin X_j ve X_q reaktanslarına eklenerek gerilim vektör diyagramı çizilir, sonra daha önce belirtildiği gibi bütün gerilim değerleri $X_1 + ZX_n$ değeri ile (hattın direnci yok sayılabilir) bölünerek akım diyagramı elde edilir (Bak: K.Bonfert: Betriebsverhalten der Synchronmaschine).

Not:

Kuramsal kararlılık eğrisinden (Z) % 10 ya da % 15 daha sağdaki pratik kararlılık eğrisini (Z') elde etmek için, kuramsal kararlılık eğrisinin 0, 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; vb. sabit uyarma lemniskatlarını kestiği noktalardan indirilen dikler üzerinde kesim noktasından itibaren dikme boyunun % 15 (0,15 P_w) alınarak bulunan noktalardan çizilen yatayların ait oldukları lemniskatları kestikleri noktaları birleştirirsek % 15 daha güvenilir pratik kararlılık eğrisi (Z') elde edilmiş olur.