

14180

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LIAPUNOV'UN İKİNCİ YÖNTEMİYLE

GÜÇ SİSTEMLERİNİN GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh.Cengiz BEKTAŞ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 4 Haziran 1990

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Haziran 1990

Tez Danışmanı : Prof.Dr.M.Emin TACER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr.Nesrin TARKAN
Doç.Dr.Adnan KAYPMAZ

Y. G.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi
HAZİRAN 1990

ÖNSÖZ

Bu tezde, Liapunov'un ikinci yöntemiyle güç sistemlerinin geçici hal kararlılık analizi incelenmiştir. Burada gerek tez konusunun belirlenmesi ve gerekse çalışmanın yönlendirilmesinde değerli yardımlarını gördüğüm, hocam Prof.Dr.M.Emin TACER'e teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. LIAPUNOV TEORİSİ.....	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. Kararlılık Kavramı.....	6
2.2.1. Liapunov Kararlılığı.....	7
2.3. Liapunov'un Birinci Yöntemi.....	8
2.4. Liapunov'un İkinci Yöntemi.....	9
2.5. Güç Sistemlerine Uygulama.....	11
BÖLÜM 3. GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ.....	12
3.1. Giriş.....	12
3.2. Kararlılık Kriteri.....	13
3.3. Liapunov Fonksiyonunun Kurulması.....	16
3.3.1. Sistem Modeli.....	16
3.3.2. Sistemin Kararlılık Kontrolü.....	21
3.3.3. Matris Denklemlerin Çözümü.....	24
3.3.4. Liapunov Fonksiyonu.....	28
3.4. Geçici Hal Kararlılık Bölgesi.....	30
3.5. Liapunov Fonksiyonunun Kritik Değerinin Saptanması.....	34
BÖLÜM 4. UYGULAMA.....	36
4.1. Giriş.....	36
4.2. Newton-Raphson Yöntemi.....	36
4.2.1. Yük Akışı.....	38
4.2.2. Arıza Sonrası Kararlı Denge Noktaları.....	40
4.3. Arıza Öncesinde İç Generatör Gerilimleri.	43
4.4. Bara Admitans Matrislerinin İndirgenmesi.....	43
4.5. Generatör Mekanik Güçleri.....	44
4.6. Düzeltilmiş Euler Yöntemi.....	44
4.7. Bilgisayar Programı.....	48
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	50
KAYNAKLAR.....	52
EK A.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÖZET

Bu tezde, güç sistemlerinde generatörlerdeki akı değişimlerini de içeren bir matematiksel model kullanılarak Liapunov'un ikinci yöntemi ile geçici hal kararlılık analizi yapılmıştır. Önce, sözkonusu model için Popov kararlılık kriterinin genelleştirilmesi, Liapunov fonksiyonunun kurulması ve sonra da geçici hal kararlılık bölgesi bazı literatüre paralel olarak incelenmiş, ayrıca, bu yöntemle kritik arıza temizleme süresini belirleyen bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

SUMMARY

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS OF POWER SYSTEMS WITH LIAPUNOV'S SECOND METHOD

The intuitive idea of stability of a physical system is as follows: Let the system be in some equilibrium state. If on the occurrence of a disturbance, the system eventually returns to the equilibrium position, we say the system is stable. The system is also termed stable if it converges to another equilibrium position generally in the proximity of the initial equilibrium point. This intuitive idea is also applicable to a power system.

The stability of an interconnected power system is its ability to return to normal or stable operation after having been subjected to some form of disturbance.

Liapunov's second method was introduced to determine whether an equilibrium state of a system is stable or asymptotically stable by Liapunov who was a Russian mathematician. An important advantage of the method is that stability of systems can be determined without having to explicitly study the system solutions.

The principle idea of the method is contained in the following reasoning: If the rate of change dV/dt of the energy $V(x)$ of an isolated physical system is negative for every possible state x except for a single equilibrium state x_e , then the energy will continually decrease until it finally assumes its minimum value $V(x_e)$. When the description of the system is given in a mathematical form, there is no way of defining energy. Hence, $V(x)$ is a scalar function proportional to the energy. If for a given system, one is able to find a function $V(x)$ such that it is always positive except at $x=0$ (assuming $x_e=0$) where it is zero and its time derivative $V(x)$ is negative except at $x=0$ where it is zero, then we say the system returns to the origin if it is disturbed, i.e., the system is stable. The function $V(x)$ is called the Liapunov function.

Stability considerations have been recognized as an essential part of power systems planning for a long time. With interconnected systems continually growing in size and extending over vast geographical regions, it is becoming increasingly more difficult to maintain synchronism between various parts of a power system.

The classical stability analysing methods may be suitable for off-line studies such as simulation may not be suitable for on-line application since a large number of contingencies have to be simulated in a short time. A technique which offers promise for this purpose is Liapunov's second method. The appeal of this method lies in its ability to compute directly the critical clearing time of circuit breakers for various faults and thus directly assess the degree of stability for a given configuration and operating state. The critical clearing time can also be translated in terms of additional power disturbances that the system can withstand, thus offering a tool for dynamic security assessment.

The study of stability in the presence of small disturbances constitutes what is known as "dynamic stability analysis" in the literature. The mathematical model for such a study is a set of linear time-invariant differential equations. When the disturbances are large, the nonlinearities inherent in the power system can no longer be ignored and the study of stability under such circumstances constitutes what is known as "transient stability analysis". The mathematical model for such a study is a set of nonlinear differential equations coupled with a set of nonlinear algebraic equations.

The mathematical model of a power system including flux decay effects is as follows:

$$m_i \frac{d^2 \delta_i'}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i'}{dt} = P_{mi} - P_{ei}$$

for $i=1,2,\dots,n$ (1)

$$T_{doi}' \frac{dE_{qi}'}{dt} = E_{fdi} - E_{qi}' - (x_{di} - x_{di}') i_{di}$$

where, for generator i ,

- P_{mi} : mechanical power input
- P_{ei} : electric power output
- m_i : angular momentum constant
- d_i : damping power coefficient
- E_{qi}' : voltage related with the internal voltage as in Fig.1, and δ_i' indicates a rotor angle relative to a reference frame rotating at synchronous speed.
- E_{fdi} : excitation voltage

i_{di} : d-axis armature current
 x_{di}, x'_{di} : d-axis synchronous, transient reactances
 T'_{doi} : d-axis transient open-circuit time constant

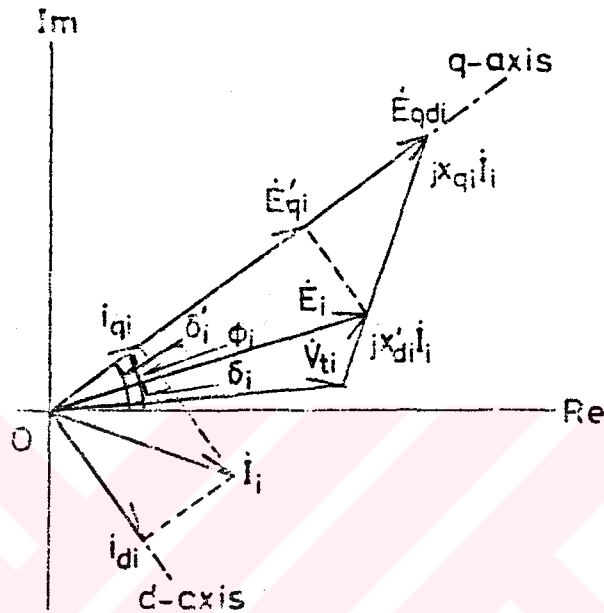


Fig.1. Relations between generator variables

In the Fig.1, where

E_i / δ_i : internal voltage
 V_{ti} : terminal voltage
 I_i : armature current
 x_{qi} : q-axis synchronous reactance

This system can be represented by the Fig.2, where the matrix $W(s)$ is the linear part and the matrix $F(\sigma)$ is the nonlinear part of the system. For this system, stability criterion (generalized Popov criterion) is as follows:

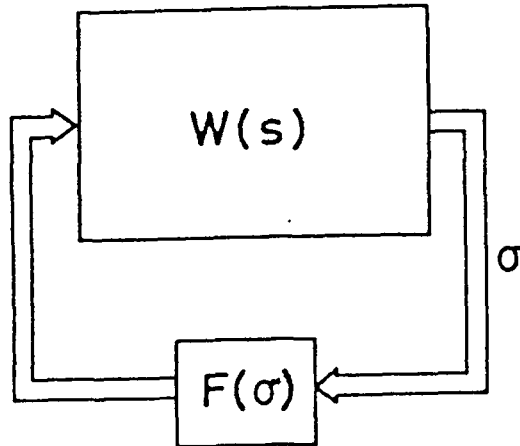


Fig.2. Nonlinear system model

Theorem: If there exist real matrices N and Q such that

$$Z(s) = (N+Qs)W(s) \quad (2)$$

is positive real, then the system shown in Fig.2 is stable, where $(N+Qs)$ does not cause pole-zero cancellations with $W(s)$.

Liapunov function for this system can be chosen as

$$V(x) = x^T P x + 2V_1(\sigma) \quad (3)$$

where x is the state vector of the system. The positive definiteness of P and the positive semi-definiteness of $V_1(\sigma)$ ensure that $V(x)$ is positive for every nonzero x .

To construct a Liapunov function, three assumptions must be made:

- (i) Excitation voltage is constant.
- (ii) Each internal voltage $\dot{E}_i$ lags behind the q -axis by a constant angle ϕ_i all the time.
- (iii) Transfer conductances G_{ij} are all negligible.

Under these assumptions, (1) reduces to

$$m_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n B_{ij} (E_i^0 E_j^0 \sin \delta_{ij}^0 - E_i E_j \sin \delta_{ij})$$

$i=1, 2, \dots, n \quad (4)$

$$T_{doi}' \frac{dE_i}{dt} = -(E_i - E_i^0) - (x_{di} - x_{di}') \sum_{j=1}^n B_{ij} (E_j^0 \cos \delta_{ij}^0 - E_j \cos \delta_{ij})$$

and if damping torques are uniform or zero the Liapunov function is obtained as

$$\begin{aligned} V(x) = & (1/2 \sum_{i=1}^n m_i) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_i m_j (w_i - w_j)^2 \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} [E_i E_j (\cos \delta_{ij}^0 - \cos \delta_{ij}) \\ & \quad - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^0) E_i^0 E_j^0 \sin \delta_{ij}^0] \\ & + \sum_{i=1}^n (\alpha_i / \beta_i) (E_i - E_i^0)^2 \\ = & V_k(w) + V_p(\delta, E) + V_f(E) \end{aligned} \quad (5)$$

where

- w_i : angular velocity, $d\delta_i/dt$
- B_{ij} : susceptance component of transfer admittance $\dot{Y}_{ij}$ between the i . and j . generators,
 $\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$
- δ_{ij} : $\delta_i - \delta_j$
- α_i, β_i : some parameters

The superscript "o" denotes the stable equilibrium state of the post-fault system. V_k and V_p are kinetic and potential energies, respectively.

To estimating critical fault clearing time, it is necessary that the critical value of V for a given disturbance is defined by the value of V_p at the instant when the system crosses a boundary of the transient stability region. This instant can be detected by checking the sign of dV_k/dt which changes from negative to positive at the instant.

Lastly, the computer program computing critical fault clearing time is developed and an example is given.



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çağımızdaki gelişmeler enerji ihtiyacını hızla arttırmaktadır. Farklı enerji türlerine dönüştürülebilirliği, verimliliği, güvenilirliği ve diğer tüm üstün özellikleri düşünüldüğünde, elektrik enerjisi büyük öneme sahiptir.

Enerji sistemlerinin güçleri arttıkça önemli işletme ve kontrol sorunları ortaya çıkmaktadır. Kararlılık problemi, bu sorunların en önemlisini oluşturur. Bir güç sisteminin kararlılığı, onun, bir bozucu etki sonrası normal veya kararlı çalışma şekline dönme yeteneği ile ilgilidir. Kararlılık, işletme sırasında sürekli denetlenmesi gereken bir sorun olmasının yanında, güç sistemlerinin planlanmasında da uzun zamandır önemli bir bölüm olarak ele alınmaktadır. Bu bakımdan, otomatik güç kesicilerinin seçiminde kritik arıza temizleme süresinin belirlenmesi önemlidir.

Enerji ihtiyacının artması sonucu güç sistemlerinin büyümesi, sistemin çeşitli kısımları arasındaki uyumu giderek zorlaştırmaktadır. Ayrıca, sistemdeki elektriksel yüklerin gerektirdiği gerilim ve frekans belirli toleranslar içinde kalmalı ve sürekli olmalıdır. Başka bir anlatımla, güvenilirlik ve kalite, bir güç sisteminden istenen en önemli iki özelliktir. Bunlar ise ancak sistemin kararlı çalışması ile sağlanabilir.

Güç sistemlerinin en önemli elemanları senkron generatörlerdir. Sistemin güvenilir olarak işleyişi, büyük ölçüde bunların birbirlerine göre uyumlu (senkron) çalışmalarına bağlıdır. Bir senkron generatörün senkronizmadan ayrılması sonucu, sistem gerilim ve akımında salınımlar oluşur ve enerji iletim hattı otomatik olarak devre dışı kalır. Böyle bir durumda senkronizmadan ayrılan generatör

devreden çıkarılır ve tekrar senkron çalışma haline döndürüldükten sonra devreye alınarak yeniden yüklenir.

Tam bir kararlılık analizinin karmaşık olması, kararlılığı bozucu etki tipine göre sınıflandırmayı gerekli kılar[1,2]. Söz konusu bozucu etki, sistemde önemli değişiklikler yaratmayan küçük bir etki ise, kararlılık sorunu sistemin doğrusallaştırılmış bir modeli kullanılarak incelenebilir. Bu tür analiz "dinamik kararlılık" incelemesidir. Öte yandan, incelemede doğrusallaştırılmış modelin yetersiz kaldığı büyük bozucu etkilere ilişkin kararlılık sorunu "geçici hal kararlılığı" olarak bilinir. Bu incelemede sistemin gerçeğe daha yakın modellerinin kullanılması zorunludur. Geçici hal kararlılık analizinde sistemin arıza sonrası kararlı denge durumuna dönmesini garanti eden "kritik arıza temizleme süresi"nin belirlenmesi, özellikle önemlidir.

Klasik geçici hal kararlılık analizinde kritik arıza temizleme süresi, güç sisteminin arızalı ve arıza sonrası modelleri bir bilgisayarda simüle edilerek belirlenmeye çalışılır[2,3,4]. Ancak, arıza temizleme süresinin bu biçimde belirlenmesi çok sayıda simülasyonu gerektirdiğinden hem ekonomi hem de zaman açısından uygun değildir.

Geçici hal kararlılık analizinde modern bir yöntem olarak Liapunov teorisi son 25 yıldır uygulanmaktadır. Bu yöntemde, önce arıza sonrası kararlı denge noktası çevresindeki kararlılık bölgesi kestirilmekte, sonra da arızalı sistem modeli simüle edilerek kritik arıza temizleme süresi hesaplanmaktadır. Ayrıca, arızalı sistem yörüngesi gözlenebiliyorsa, gerçek zaman uygulamalarında sistem kararlılık bölgesinden çıkmadan arızanın giderilmesi sağlanabilir.

Güç sistemlerinin kararlılık analizinde Liapunov'un ikinci yönteminin ilk uygulamalarında sistem enerjisi Liapunov fonksiyonu olarak alınmış ve senkron makinanın

klasik modeli uygulanmıştır [5,6]. Daha sonra çeşitli Liapunov fonksiyonlarının denendiği çok sayıda araştırma yapılmışsa da bunların çoğunda ya tek generatör içeren sistemler gözönüne alınmış ya da çok basit sistem modelleri kullanılmıştır [7,8].

1970'li yıllarda güç sistemlerinin Lure-Popov türü sistemler biçiminde modellenebileceği gözlemlendikten sonra Liapunov yöntemi yaygınlık kazanmış ve daha verimli bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır [7,9,10,11]. Ancak, bu süre içerisinde yapılan çok sayıda araştırmaya karşın, özellikle generatörler arası eşdeğer admitansların iletkenliklerini de göz önünde tutan genel bir Liapunov fonksiyonu geliştirilememiştir. Bunun başlıca nedeni ise kullanılan modellerde yüklerin de eşdeğer admitanslara dönüştürülmesi (böylece bu modellere eşdeğer admitans modeli adı verilebilir) sonucu generatörler arası admitansların iletkenliklerinin ihmal edilemeyecek kadar büyük olmalarıdır. Öte yandan, sistemdeki yüklerin birinci derece yük frekans denklemleriyle gösterildiği yapı koruyucu modelde söz konusu sakınca ortadan kalkmaktadır. [11] numaralı çalışmada "eşdeğer admitans modeli" ile "yapı koruyucu model" karşılaştırılmış ve yapı koruyucu modelin daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Ancak, bu modellerde senkron generatörler için akının sabit kaldığı kabul edilmiştir. Başka bir deyimle, senkron makinelerin klasik modelleri için inceleme yapılmıştır.

Liapunov'un ikinci yöntemi ile geçici hal kararlılık analizi iki ana kısımdan oluşur: Liapunov fonksiyonunun kurulması ve kritik değerinin belirlenmesi. Liapunov fonksiyonunun kurulması ile ilgili olarak, Moore ve Anderson [13] tarafından ortaya konan ve Popov kararlılık kriterinin genelleştirilmesine dayanan sistematik bir yöntem vardır. Bu yöntem, çok makinalı sistemler için Liapunov fonksiyonu kurmaya elverişlidir [9] ve elde edi-

len Liapunov fonksiyonu enerji fonksiyonuna eşdeğerdir. Bununla birlikte Moore-Anderson kriteri tek argümanlı nonlineerlik durumlarında uygulanabilir olduğundan, basit sistem modelleriyle sınırlanmıştır. Akı değişiminin gözönüne alındığı durumlarda ise sistem modeli için çok argümanlı nonlineerlik sözkonusudur. Bu durumda uygulanabilecek bir başka kriter, Pai ve Rai [14] tarafından tek makinalı sistemler için ifade edilmekle birlikte, çok makinalı sistemlerde akı değişiminin gözönüne alınmasında da uygulanabilir. Fakat bu halde, sistem denklemlerinde kısmen bir değişiklik yapılması gerekir ve bu da Liapunov fonksiyonu kurmayı zorlaştırır.

Bu zorluk, genel şekildeki sistemler için yeni bir kriter türetilerek giderilmiş [15], ayrıca analize, bilgisayar için elverişli ve sistematik bir biçim verilmiştir [16]. Öte yandan Sasaki, akı değişimini parametre olarak kullanmıştır [17]. Liapunov fonksiyonunun kritik değeri ile ilgili olarak birkaç yöntem vardır [15,18,19]. Kararlı denge noktasına en yakın eyer noktasındaki potansiyel enerjinin kritik değer olarak kullanılması, Liapunov yöntemini kötüleştirmekteydi. Bu sakınca, birinci salının kararsızlığına karşı gelen eyer noktasının seçilmesi ile giderilmiştir. Bu konuda [15] nolu çalışmada pratik bir yöntem gösterilmiştir. Bu yöntemde eyer noktalarının hesaplanması gerekmemektedir.

Liapunov yöntemi üzerine yapılan araştırmaların önemli bir bölümü, kullanılan matematiksel modelin iyileştirilmesine yöneliktir. Bu tezde, söz konusu doğrultu paralelinde akı değişimlerinin de sistem modeline katılması incelenmiştir. Önce genel olarak Liapunov teorisi verilmiş ve bu teorinin güç sistemlerine uygulanabilirliği gösterilmiştir. Sonra, çok argümanlı nonlineerliğin söz konusu olduğu sistemler için Popov kriterinin genelleştirilmesi ve bu genel kriterin akı değişiminin de gözönüne alındığı çok makinalı güç sistemlerine uygulanması incelenmiş, geçici hal kararlılık bölgesi tanımlanmıştır. Son bölümde de bu inceleme doğrultusunda, geçici hal

kararlılık analiziyle kritik arıza temizleme süresinin belirlenmesi için gerekli bilgisayar programı bazı yaklaşımlarla geliştirilmiştir.



BÖLÜM 2. LIAPUNOV TEORİSİ

2.1. Giriş

Rus matematikçisi Liapunov, diferansiyel denklemlerin çözümünün kararlılığı üzerine iki önemli yöntem açıklamıştır. 1892 yılında açıklanan bu iki yöntem, uygulamada kullanma açısından şu biçimde açıklanabilir [20,21]:

Birinci yöntem, diferansiyel denklemin çözümünü kullanır ve dinamik sistemin kararlı olup olmadığını saptamaya yarar.

İkinci yöntem ise dinamik sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü bulmadan sistemin kararlılığını inceleme olanağı verir. Lineer olmayan diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri elde edilemediğinden böyle sistemlerin kararlılığı, Liapunov'un ikinci yöntemi ile incelenebilir. Böylece Liapunov'un ikinci yöntemi daha önemlidir.

2.2. Kararlılık Kavramı

Tanım 1: Sıfır girişli ve herhangi ilk koşullu bir sistemde, durum uzayında sistem yörüngesi orjine gidiyorsa sistem kararlı, sonsuza gidiyorsa kararsızdır.

Tanım 2: Bir sistemin girişine uygulanan bütün sınırlı giriş işaretleri için çıkışı da sınırlı kalıyorsa sistem kararlı, çıkışı sınırsız oluyorsa kararsızdır.

Bu tanımların birincisi serbest sistemin "geçici davranışı" ile, ikincisi ise giriş etkisindeki bir sistemle ilgilidir. Lineer olmayan sistemlerde geçici davranış, sürekli halden oldukça farklı olduğundan bu iki tanım arasında bir uygunluk yoktur.

2.2.1. Liapunov Kararlılığı

Tanım 1: x , $n \times 1$ durum vektörü ise $||x||$ 'e

$$||x|| = \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{1/2} = (x^T \cdot x)^{1/2} \quad (2.1)$$

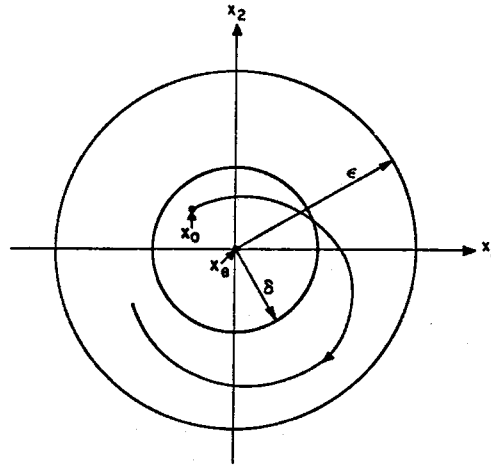
olmak üzere, x durum vektörünün normu denir.

Tanım 2: $\dot{x} = f(x,u,t)$ sisteminde, her t için

$$f(x_e, 0, t) = 0 \quad (2.2)$$

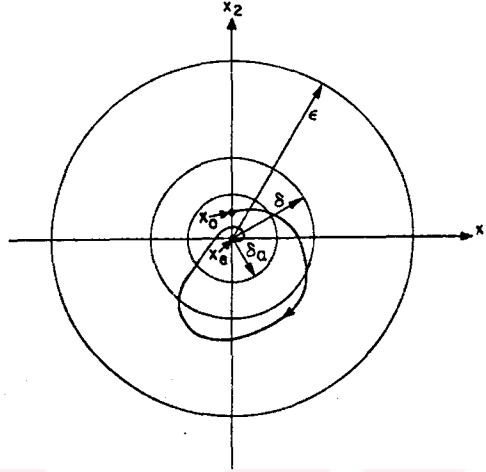
ise, x_e ler bu serbest dinamik sistemin denge durumlarıdır.

Tanım 3: Bir R bölgesinde her $\epsilon > 0$ için, yalnızca ϵ 'a bağlı bir $\delta > 0$ varsa, öyle ki (x_0, t_0) başlangıç noktası olmak üzere bütün $t > t_0$ lar için $||x_0 - x_e|| < \delta$ ve $||x(t, x_0) - x_e|| < \epsilon$ oluyorsa dinamik sistemin x_e denge noktaları kararlıdır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Kararlılık

Tanım 4: Tanım 3'deki özelliklerle birlikte bir δ_a bulunabilirse, öyle ki x_e 'nin δ_a civarından başlayan her hareket $t \rightarrow \infty$ iken x_e 'ye yakınsıyorsa, dinamik sistemin x_e denge noktaları asimptotik olarak kararlıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Asimptotik kararlılık

2.3. Liapunov'un Birinci Yöntemi

Teorem: $\dot{x}=f(x)$ sistemi için, sistemin x_e denge durumundan sapma denklemi

$$\Delta \dot{x} = \frac{\partial f(x_e)}{\partial x} \Delta x + h(x_e, \Delta x) \quad (2.3)$$

olmak üzere

$$\lim_{||\Delta x|| \rightarrow 0} \frac{h(x_e, \Delta x)}{||\Delta x||} = 0 \quad (2.4)$$

oluyorsa, doğrusallaştırılmış

$$\Delta \dot{x} = \frac{\partial f(x_e)}{\partial x} \Delta x \quad (2.5)$$

sisteminin

i) sadece negatif reel kısımlı çözümleri varsa x_e denge noktaları asimptotik kararlı,

ii) pozitif reel kısımlı bir veya daha fazla çözümü varsa kararsız,

iii) bir veya daha fazla sıfır reel kısımlı çözümü varsa ve diğer çözümler de negatif reel kısımlı kalıyorsa x_e denge noktalarının kararlılığı doğrusallaştırılmış sistemden belirlenemez.

2.4. Liapunov'un İkinci Yöntemi

Liapunov'un ikinci yöntemi, dinamik bir sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü elde etmeksizin, denklemin biçiminden dinamik sistemin kararlı olup olmadığının belirlenmesini sağlar. Rus matematikçisi Liapunov sistemin içinde biriktirilen enerji ile sistemin dinamiği arasında bağıntı kuracak bir fonksiyonu, enerji kavramını gözönüne alarak vermiştir.

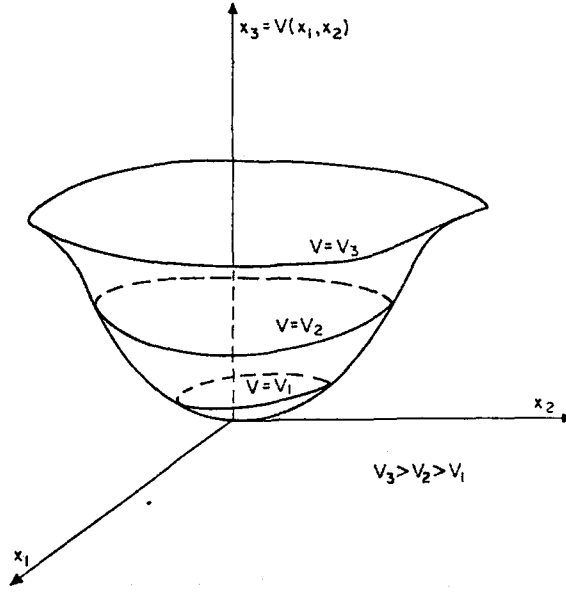
Genel bir açıklama için ikinci dereceden bir sistem düşünelim:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) , \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) \text{ ve}$$

$$f_1(0,0) = f_2(0,0) = 0$$

olsun. Buna göre orjin, kararlılığın gerçekleştiği denge durumudur. Sistemle ilgili bir $V(x_1, x_2)$ fonksiyonunun bulunduğu ve bu fonksiyonun orjinde "0", bunun dışında her zaman pozitif değerler aldığını kabul edelim (Şekil 2.3).

Sistemin durumları, (x_{10}, x_{20}) ilk koşullarından V 'yi azaltacak yönde hareket ettirilirse, açıktır ki orjin dışında sistem durumlarının gidecek başka yeri olmaz. Öyleyse sistem asimptotik olarak kararlıdır.



Şekil 2.3. Orjin dışında her zaman pozitif olan bir $V(x_1, x_2)$ fonksiyonu

Fiziksel sistemler için yazılan enerji fonksiyonları kesin pozitif olduklarından Liapunov fonksiyonu olarak alınabilirler. Toplam enerjisi sürekli olarak azalan bir sistemde ise enerji fonksiyonunun zamana göre türevi negatif olur. Liapunov'un ikinci yöntemi bu özelliklere dayanır.

Genel olarak n . dereceden bir sistem için skaler $V(x)$ Liapunov fonksiyonu şu koşulları sağlar:

i) $V(x)$, orjin çevresindeki bir R bölgesinde sürekli ve sürekli birinci kısmi türeve sahiptir.

ii) R bölgesinde $V(x)$ kesin pozitifdir ($V(0)=0$ ve $V(x)>0$).

iii) R bölgesinde $V(x)$ 'in sistem yörüngesi boyunca zamana göre türevi yarı kesin negatiftir ($\dot{V}(x) \leq 0$).

$$\dot{V}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} = (\text{grad } V)^T \cdot \dot{x} = (\nabla V)^T f(x) \quad (2.6)$$

1. Kararlılık Teoremi: $\dot{x}=f(x)$, $f(0)=0$ sistemi için orjin civarındaki bir R bölgesinde bir Liapunov fonksiyonu bulunabilirse sistem orjinde kararlıdır.

2. Kararlılık Teoremi: $\dot{V}(x)<0$ (kesin negatif) ise sistem orjinde asimptotik kararlıdır.

2.5. Güç Sistemlerine Uygulama

Alışıl gelmiş basitleştirici varsayımlar altında [2,3,4] her generatör

$$\begin{aligned} m_i \ddot{\delta}_i + d_i \dot{\delta}_i &= P_{mi} - P_{ei} \\ \dot{\delta}_i &= w_i \end{aligned} \quad (2.7)$$

biçiminde modellenenebilir. Burada δ_i i. generatörün rotor açısını w_i açısal hızını, P_{mi} ve P_{ei} mekanik ve elektriksel gücü, m_i ve d_i eylemsizlik ve sönüm katsayılarını göstermektedir.

(2.7) denklemleri düzenlenirse

$$\begin{aligned} \dot{w}_i &= -\frac{d_i}{m_i} w_i + g(\delta_i) \\ \dot{\delta}_i &= w_i \end{aligned} \quad (2.8)$$

yazılabilir. $x_{1i}=w_i$ ve $x_{2i}=\delta_i$ olarak alınır ise $\dot{x}=f(x)$ şeklindeki bir biçime ulaşılabilir. Böylece Liapunov'un ikinci yöntemi, bölüm 2.4'de verilen bilgiler ışığında güç sistemlerinin kararlılık analizinde uygulanabilir. Bölüm 3.3'de, gözönüne alınan model için uygun Liapunov fonksiyonunun nasıl seçileceği gösterilmiştir.

BÖLÜM 3. GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ

3.1. Giriş

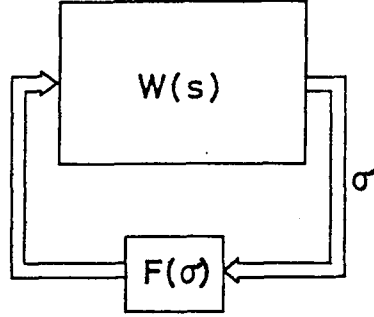
Güç sistemlerinde kararlılık analizinin en önemli amacı arıza durumunda kritik arıza temizleme süresini belirlemektir. Bu süre, sistemin arıza giderildikten sonra kararlı denge durumuna dönebilmesi koşuluyla arıza durumunda geçirebileceği en uzun süredir.

Kritik arıza temizleme süresi, sistemin arızalı ve arıza sonrası durumlarının simülasyonu ile belirlenebilirse de, özellikle arıza giderilmeden önce sistem yapısında birden çok değişiklik olduğu takdirde çok sayıda simülasyon gerekeceğinden bu yöntem hem pahalı hem de gerçek zaman uygulamaları için elverişli değildir.

Kritik arıza temizleme süresini belirlemede alternatif bir yöntem de, arıza sonrası denge noktasının kararlılık bölgesini kestirmektir. Kararlılık bölgesi belirlenebilirse, kritik arıza temizleme süresi, yörüngesi kararlılık bölgesi sınırına ulaşınca kadar arızalı sistemin bir kez simüle edilmesiyle hesaplanabilir.

Kararlılık analizinde Liapunov yönteminin en yararlı yönü de kararlılık bölgesinin bir kestiriminin hesaplanabilmesidir. Bu bölümde, gözönüne alınan güç sistemi modeli için uygun Liapunov fonksiyonunun kurulması ve kararlılık bölgesinin kestirilmesi incelenmiştir.

3.2. Kararlılık Kriteri



Şekil 3.1. Lineer olmayan sistem modeli

Şekil 3.1'deki gibi lineer olmayan bir sistemi göz önüne alalım. Liapunov kararlılığı düşünüldüğü için girişler gösterilmemiştir. Bu sistemin durum denklemleri

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax - BF(\sigma) \\ \sigma &= C^T x\end{aligned}\tag{3.1}$$

biçimindedir. Sistemin lineer kısmı $W(s)$ $m \times m$ boyutlu,

$$W(\infty) = 0\tag{3.2}$$

koşulunu sağlayan ve (A, B, C) üçlüsünden oluşan transfer fonksiyonu matrisidir. Lineer olmayan kısım $F(\sigma)$ 'nın aşağıdaki koşulları sağladığı kabul edilecektir.

- i) $F(\sigma)$ sürekli ve R^m bölgesi içindedir.
- ii) Sabit ve reel bir N matrisi için

$$F^T(\sigma)N\sigma \geq 0, \sigma \in R^m\tag{3.3}$$

$$F(0) = 0\tag{3.4}$$

iii) R^m bölgesi içinde öyle bir $V_1(\sigma)$ fonksiyonu vardır ki

$$V_1(\sigma) \geq 0, \sigma \in R^m \quad (3.5)$$

$$V_1(0) = 0 \quad (3.6)$$

olmakta, ayrıca sabit ve reel bir Q matrisi için

$$\nabla V_1(\sigma) = Q^T F(\sigma), \sigma \in R^m \quad (3.7)$$

eşitliği gerçekleşmektedir. Böyle bir sistem için kararlılık kriteri şu şekilde verilebilir [15] :

Teorem :

$$Z(s) = (N + Qs) W(s) \quad (3.8)$$

ifadesi pozitif reel ise Şekil 3.1'deki sistem kararlıdır. Burada $(N+Qs)$ ile $W(s)$ kutup-sıfır gidermesine yol açmamalıdır.

Teoremi ispatlamak için yardımcı bir teoreme gerek vardır [22] .

Yardımcı Teorem: $Z(\infty)$ sonlu ve $Z(s)$ 'in kutupları $\text{Re } s < 0$ veya $\text{Re } s = 0$ 'da bulunmak üzere $Z(s)$, transfer fonksiyonları matrisi olsun. (A, B, C) üçlüsü $Z(s) - Z(\infty)$ 'un minimal gerçekleştirilebilirliğini sağlasın. $Z(s)$, sadece ve sadece (3.9) eşitliklerini sağlayan kesin pozitif bir P matrisi ve W_0 ve L matrisleri varsa pozitif reeldir.

$$\begin{aligned} PA + A^T P &= -LL^T \\ PB &= C - LW_0 \\ W_0^T W_0 &= Z(\infty) + Z^T(\infty) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Şimdi bu yardımcı teorem kullanılarak ispata geçilebilir.

İspat: (A,B,C) üçlüsü W(s) transfer matrisini şu şekilde oluşturur:

$$W(s) = C^T(sI-A)^{-1}B \quad (3.10)$$

(3.10), (3.8)'de yerine konursa

$$\begin{aligned} Z(s) &= NC^T(sI-A)^{-1}B + QC^T[(sI-A)+A](sI-A)^{-1}B \\ &= QC^TB + (NC^T + QC^TA)(sI-A)^{-1}B \end{aligned} \quad (3.11)$$

elde edilir. Z(s) pozitif reel olduğundan yukarıdaki yardımcı teorem (A,B,CN^T+A^TCQ^T) üçlüsü için uygulanabilir. Böylece (3.9), (3.12)'ye dönüşür.

$$\begin{aligned} PA + A^TP &= -LL^T \\ PB &= CN^T + A^TCQ^T - LW_o \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$W_o^TW_o = QC^TB + B^TCQ^T$$

Şekil 3.1'deki sistem için (3.13) deki gibi bir Liapunov fonksiyonu denenebilir [13,15] .

$$V(x) = x^TPx + 2V_1(\sigma) \quad (3.13)$$

burada x, sistemin durum vektörüdür. P'nin kesin pozitif ve V₁(σ)'nın yarı-kesin pozitif olması V(x)'in, her sıfırdan farklı x için pozitif olmasını garanti eder. V(x)'in zamana göre türevi alınırsa

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \dot{x}^TPx + x^TP\dot{x} + 2V_1^T(\sigma) \dot{\sigma} \\ &= [x^TA^T - F^T(\sigma)B^T]Px + x^TP[Ax - BF(\sigma)] \\ &\quad + 2F^T(\sigma)QC^T[Ax - BF(\sigma)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= x^T(PA+A^TP)x-2x^T(PB-A^TCQ^T)F(\sigma) \\
 &-F^T(\sigma)(QC^TB+B^TCQ^T)F(\sigma) \\
 &= -x^TLL^Tx+2x^TLW_oF(\sigma)-2x^TCN^TF(\sigma) \\
 &-F^T(\sigma)W_o^TW_oF(\sigma) \\
 &= -[x^TL-F^T(\sigma)W_o^T][L^Tx-W_oF(\sigma)] \\
 &-2F^T(\sigma)N\sigma
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

elde edilir. Açıkça görünüyor ki, birinci terim negatiftir... (3.3) gereği ikinci terim de negatiftir. Böylece $\dot{V}(x)$ pozitif değildir ve teorem ispatlanmış olur (bkz. bölüm 2.4).

3.3. Liapunov Fonksiyonunun Kurulması

3.3.1. Sistem Modeli

Geçici hal kararlılık analizinde, generatörlerdeki akı değişimi de hesaba katılarak n-makinalı bir güç sistemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [4,7, 15,16,17]:

$$m_i \frac{d^2\delta'_i}{dt^2} + d_i \frac{d\delta'_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \tag{3.15}$$

$i=1,2,\dots,n$

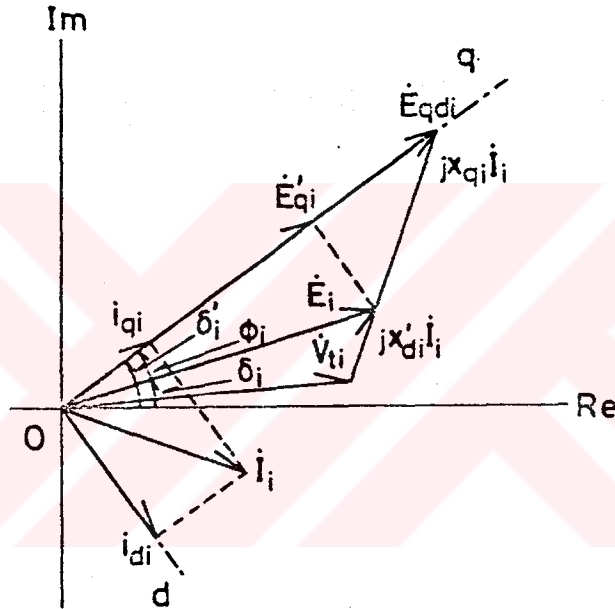
$$T'_{doi} \frac{dE'_{qi}}{dt} = E_{fdi} - E'_{qi} - (x_{di}-x'_{di})i_{di}$$

burada, i.generator için

P_{mi} : mekanik giriş gücü
 P_{ei} : elektriksel çıkış gücü
 m_i : açısal moment sabiti

- d_i : sönüm gücü sabiti
 E'_{qi}/δ'_i : iç generatör geriliminin q-eksenindeki izdüşümü
(Şekil 3.2)
 E_{fdi} : uyarma gerilimi
 i_{di} : d-ekseni akımı
 x_{di}, x'_{di} : d-ekseni senkron ve geçici reaktansları
 T'_{doi} : d-ekseni açık devre geçici zaman sabiti

anlamındadır.



Şekil 3.2. Generatör değişkenleri arasındaki ilişkiler

Liapunov fonksiyonunu bulmak için üç kabul yapmak gereklidir.

- i) Uyarma gerilimi sabittir.
- ii) Her bir iç gerilim, her bir generatörün q-eksenini sabit bir ϕ_i açısı ile izler.
- iii) İndirgenmiş admitans matrisinde iletkenlikler ihmal edilebilir ($G_{ij} \approx 0$)

Bu kabuller altında

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n B_{ij} E_i E_j \sin \delta_{ij} , i=1,2,\dots,n \quad (3.16)$$

$$i_{di} = E_i B_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} E_j \cos \delta_{ij} , i=1,2,\dots,n \quad (3.17)$$

ifadeleri geçerlidir. Burada

- B_{ij} : i.generator ile j.generator arasındaki admitansın imajiner kısmı, $\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$
 E_i / δ_i : i.generatorün iç gerilimi
 δ_{ij} : $\delta_i - \delta_j$

ϕ_i açısı küçük ise (3.16) ve (3.17) ifadeleri (3.15)'de kullanıldığında

$$m_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i}{dt} = P_{mi} - \sum_{j=1}^n B_{ij} E_i E_j \sin \delta_{ij} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.18)$$

$$T'_{doi} \frac{dE_i}{dt} = E_{fd} - E_i - (x_{di} - x'_{di}) \left[E_i B_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} E_j \cos \delta_{ij} \right]$$

olur. Generatörlere ait mekanik giriş güçlerinin, arıza öncesi, sırası ve sonrasında sabit kabul edilmesi, alışılabilir bir varsayımdır. Böylece, arıza öncesi denge durumu bir yük akışı analizi [2,4] ile hesaplanarak

$$P_{mi} = P_{eio} \quad (3.19)$$

ifadesi elde edilir. Bölüm 2.2.1'de verilen bilgiler ışığında arıza sonrası denge durumları bulunabilir. Böylece (3.18) denklemleri

$$m_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n B_{ij} (E_i^0 E_j^0 \sin \delta_{ij}^0 - E_i E_j \sin \delta_{ij})$$

$$i=1, 2, \dots, n \quad (3.20)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = -\alpha_i (E_i - E_i^0) - \beta_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} (E_j^0 \cos \delta_{ij}^0 - E_j \cos \delta_{ij})$$

biçiminde yazılabilir. Burada,

$$\alpha_i = [1 - (x_{di} - x'_{di}) B_{ii}] / T'_{doi}$$

$$(3.21)$$

$$\beta_i = (x_{di} - x'_{di}) / T'_{doi}$$

dir. Ayrıca "o" üstel işareti, arıza sonrası kararlı denge noktası anlamındadır.

(3.20) denklemleri

$$A = \begin{bmatrix} 0 & K_{n(n-1)}^T & 0 \\ 0 & -M_{nn}^{-1} D_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_{nn} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M_{nn}^{-1} T_{nm} & 0 \\ 0 & \beta_{nn} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} G_{(n-1)m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$M_{nn} = \text{köşegen}(m_i)$$

$$D_{nn} = \text{köşegen}(d_i)$$

$$\alpha_{nn} = \text{köşegen}(\alpha_i)$$

$$\beta_{nn} = \text{köşegen}(\beta_i)$$

(3.23)

$$K_{n(n-1)} = \begin{bmatrix} 1_{1(n-1)} \\ \\ -I_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \quad G_{(n-1)m} = \begin{bmatrix} I_{(n-1)(n-1)} - T_{(n-1)(m-n+1)} \end{bmatrix}$$

$$T_{nm} = \begin{bmatrix} 1_{1(n-1)} & 0_{1(m-n+1)} \\ -I_{(n-1)(n-1)} & T_{(n-1)(m-n+1)} \end{bmatrix}$$

olmak üzere (3.1) formundadır. Ayrıca

$$T_{nm} = K_{n(n-1)} G_{(n-1)m} \quad (3.24)$$

ilişkisi vardır. Satır vektörü $1_{1(n-1)}$ 'in bütün elemanları 1 ve $0_{1(m-n+1)}$ 'in bütün elemanları 0'dır. Burada $m=n(n-1)/2$ dir. I 'ler belirtilen boyutlarda birim matrislerdir. x , üç vektörden oluşan (3_{n-1}) boyutlu durum vektörüdür, şöyle ki,

$$x = [\delta_r^T \quad w^T \quad \Delta E^T]^T \quad (3.25)$$

$$\delta_{ri} = \delta_{1(i+1)} - \delta_{1(i+1)}^0, \quad i=1,2,\dots,n-1$$

$$w_i = \dot{\delta}_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.26)$$

$$\Delta E_i = E_i - E_i^0, \quad i=1,2,\dots,n$$

Lineer olmayan kısım $F(\sigma)$ iki vektörden oluşur, şöyle ki,

$$F(\sigma) = [f_1^T(\sigma) \quad f_2^T(\sigma)] \quad (3.27)$$

$f_1(\sigma)$ m -boyutlu bir vektördür ve

$$f_{1k}(\sigma) = B_{ij} [E_i E_j \sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - E_i^0 E_j^0 \sin \delta_{ij}^0] \quad (3.28)$$

$$i=1,2,\dots,n-1, \quad j=i+1,\dots,n, \quad k=1,2,\dots,m$$

ile tanımlanır. $f_2(\sigma)$ n -boyutlu bir vektördür ve

$$f_{2i}(\sigma) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} (E_j^0 \cos \delta_{ij}^0 - E_j \cos \delta_{ij}) , \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.29)$$

ile tanımlanır. Çıkış işareti σ ise $(m+n)$ -boyutlu bir vektördür ve

$$\sigma_k = \delta_{ij} - \delta_{ij}^0, \quad k=1,2,\dots,m \quad (3.30)$$

$$\sigma_k = E_i - E_i^0, \quad k=m+1,\dots,m+n$$

ile tanımlanır.

3.3.2. Sistemin Kararlılık Kontrolü

Sistemin lineer kısmı için $W(s)$ transfer matrisi aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$\begin{aligned} W(s) &= C^T(sI-A)^{-1}B \\ &= \begin{bmatrix} T^T[s(sI+M^{-1}D)]^{-1}M^{-1}T & 0 \\ 0 & I(sI+\alpha)^{-1}\beta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} W_1(s) & 0 \\ 0 & W_2(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Sistemin kararlı olması için (3.8)'deki $Z(s)$ 'i pozitif reel yapacak N ve Q matrisleri varolmalıdır. Bu problem için N matrisi şöyle seçilebilir:

$$N = \begin{bmatrix} (1/q)I_{mm} & 0 \\ 0 & 0_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Bu N matrisi ile (3.3) deki eşitsizlik (3.33)'e dönüşür.

$$f_{1k}(\sigma)\sigma_k \geq 0, \quad k=1,2,\dots,m \quad (3.33)$$

σ_k 'nin alabileceği değerler şu sınırlarla verilebilir [7, 11,15] :

$$\sigma_{\min} \leq \sigma_k \leq 0 \text{ (veya } \sigma_s) \quad (3.34)$$

$$\sigma_s \text{ (veya } 0) \leq \sigma_k \leq \sigma_{\max}$$

burada

$$\sigma_{\min} = -\pi - (\delta_{ij}^o + \delta_{ij}^s), \quad \sigma_s = \delta_{ij}^o - \delta_{ij}^s, \quad \sigma_{\max} = \pi - (\delta_{ij}^o + \delta_{ij}^s)$$

ve

$$\delta_{ij}^s = \sin^{-1}(E_i^o E_j^o \sin \delta_{ij}^o / E_i E_j),$$

(3.14)'den görüldüğü gibi $F^T(\sigma)N\sigma$ terimi $\dot{V}(x)$ 'e etki etmektedir. Bu etkinin $q \rightarrow \infty$ yapılarak sıfır yapılması istenebilir, -bkz.(3.32)- fakat q 'nun bu seçimi $(N+Qs)$ ile $W(s)$ arasında kutup-sıfır gidermesine neden olur. Çünkü, $W_1(s)$ 'in $s=0$ 'da bir kutbu vardır. Kutup-sıfır gidermesinden kaçınmak için, Liapunov fonksiyonu bulunurken q 'ya sonlu bir değer verilip, fonksiyon elde edildikten sonra $q \rightarrow \infty$ yapmak uygundur.

(3.5)'deki $V_1(\sigma)$ fonksiyonu şöyle seçilebilir [13, 15]:

$$V_1(\sigma) = \sum_{k=1}^m \int_0^{\sigma_k} f_{1k}(\sigma) d\sigma_k$$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n B_{ij} [E_i E_j (\cos \delta_{ij}^o - \cos \delta_{ij}) - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^o) E_i^o E_j^o \sin \delta_{ij}^o] \quad (3.35)$$

(3.35) ifadesinden açıkça görüldüğü gibi $V_1(\sigma)$, bütün σ değerleri için pozitif değildir. Bu yüzden bu $V_1(\sigma)$ ile sistemin geniş anlamda kararlılığı incelenemez. Fakat, bu $V_1(\sigma)$ ile elde edilen Liapunov fonksiyonu kullanılarak kararlılık bölgesi için bir kestirim yapılabilir.

$V_1(\sigma)$ 'nın kısmi türevleri aşağıdaki biçimde yazılabilir [7,15]:

$$\frac{\partial V_1}{\partial \sigma_k} = f_{1k}(\sigma) \quad , \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial \sigma_k} = f_{2i}(\sigma) \quad , \quad \begin{matrix} k=m+1, \dots, m+n \\ i=1, 2, \dots, n \end{matrix}$$

(3.36) ifadeleri birleştirilerek

$$\begin{aligned} \nabla V_1(\sigma) &= F(\sigma) \\ &= I_{(m+n)(m+n)} F(\sigma) \end{aligned} \quad (3.37)$$

elde edilir. Böylece (3.7) ifadesine göre

$$Q = I_{(m+n)(m+n)} \quad (3.38)$$

seçilmelidir.

(3.32) ve (3.38) ifadeleri (3.8)'de yerine konursa

$$\begin{aligned} Z(s) &= \begin{bmatrix} (1/q+s)T^T(sI+M^{-1}D)^{-1}M^{-1}T & 0 \\ 0 & s(sI+\alpha)^{-1}\beta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Z_1(s) & 0 \\ 0 & Z_2(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.39)$$

elde edilir. $Z(s)$ aşağıdaki koşullar altında pozitif reeldir [22] :

- i) $Z(s)$ 'in $\text{Res} > 0$ için analitik olan elemanları vardır.
- ii) $\text{Res} > 0$ için $Z^*(s) = Z(s^*)'$ dir.
- iii) $\text{Res} > 0$ için $Z^T(s^*) + Z(s)$ yarı-kesin negatiftir.

$Z(s)$, $Z_1(s)$ ile $Z_2(s)$ 'in bileşiminden oluştuğu için, $Z(s)$ 'in pozitif reel olma koşulu $Z_1(s)$ ve $Z_2(s)$ 'in ayrı ayrı pozitif reel olma koşullarının test edilmesiyle sağlanır. İlk iki koşulun $Z_1(s)$ ve $Z_2(s)$ için sağlandığı açıkça görülmektedir. Bu durumda, son koşulun sağlanması $Z(s)$ 'in pozitif reel olması için yeterlidir. Bu koşul $Z_1(s)$ ve $Z_2(s)$ için uygulanırsa

$$\begin{aligned} Z_1(jw) + Z_1^T(-jw) &= 2T^T \text{ köşegen } \left(\frac{d_i - m_i/q}{m_i w^2 + d_i} \right)^T \\ Z_2(jw) + Z_2^T(-jw) &= 2 \text{ köşegen } \left(\frac{\beta_i w^2}{w^2 + \alpha_i} \right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

elde edilir. Eğer

$$\begin{aligned} q &> m_i/d_i \\ \beta_i &> 0 \end{aligned} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.41)$$

ise, (3.40) ifadelerinin sağ yanları yarı-kesin pozitif-tir. Böylece $Z_1(s)$ ve $Z_2(s)$ pozitif reeldir. Sonuçta $Z(s)$ de pozitif reeldir. Teorem gereği sistem kararlıdır.

3.3.3. Matris Denklemlerinin Çözümü

Sistem kararlı olduğu için

$$V(x) = x^T P x + 2V_1(\sigma) \quad (3.42)$$

gibi bir Liapunov fonksiyonu vardır. Burada P , $(3n-1) \times (3n-1)$

boyutlu, kesin pozitif ve (3.12)'yi sağlayan bir matristir. (3.12) deki L , $(3n-1) \times (m+n)$ ve W_0 , $(m+n) \times (m+n)$ boyutlu matrislerdir. $Z(s) + Z^T(-s)$ aşağıdaki biçimde çarpanlarına ayrılabilir:

$$Z(s) + Z^T(-s) = Y^T(-s)Y(s) \quad (3.43)$$

Burada $Y(s)$ $(m+n) \times (m+n)$ boyutlu bir matristir. $Y(s)$, (A, B, L) 'nin minimal gerçekenirliği, yani

$$Y(s) - Y(\infty) = L^T(sI - A)^{-1}B \quad (3.44)$$

ve

$$W_0 = Y(\infty), \quad (3.45)$$

$Z(s)$, $Z_1(s)$ ve $Z_2(s)$ 'in bileşimi olduğundan, P matrisi de P_1 ve P_2 gibi iki matrisin bileşiminden elde edilebilir. Burada P_1 , $Z_1(s)$ 'e karşı gelen $(2n-1) \times (2n-1)$ boyutlu, P_2 ise $Z_2(s)$ 'e karşı gelen $n \times n$ boyutlu matrislerdir.

$W_1(s)$ transfer matrisi yeniden yazılırsa

$$W_1(s) = C_1^T(sI - A_1)^{-1}B_1 \quad (3.46)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & K^T \\ 0 & -M^{-1}D \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}T \end{bmatrix} \quad C_1 = \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

elde edilir. Bu durumda (3.12) yeniden yazılırsa

$$\begin{aligned} P_1 A_1 + A_1^T P_1 &= -L_1 L_1^T \\ P_1 B_1 &= A_1^T C_1 Q_1^T \end{aligned} \quad (3.48)$$

ve P_1 ile L_1 matrisleri bölüntülenirse

$$P_1 = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad L_1 = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{12} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

olur. Burada P_{11} $(n-1) \times (n-1)$, P_{12} $(n-1) \times n$, P_{22} $n \times n$, L_{11} $(n-1) \times m$, L_{12} $n \times m$ boyutlu matrislerdir. Ayrıca $P_{21} = P_{12}^T$ dur. (3.47) ve (3.49) ifadeleri (3.48)'de yerine konarak

$$0 = -L_{11}^T L_{11} \quad (3.50)$$

$$P_{11} K^T - P_{12} M^{-1} D = 0 \quad (3.51)$$

$$P_{21} K^T + K P_{12} - P_{22} M^{-1} D - D M^{-1} P_{22} = -L_{12}^T L_{12} \quad (3.52)$$

$$P_{12} M^{-1} T = (1/q) G \quad (3.53)$$

$$P_{22} M^{-1} T = T \quad (3.54)$$

bulunur. (3.50)-(3.54) denklemleri çözülürse [23,15],

$$K P_{11} K^T = (1/q) D + \rho D U D$$

$$K P_{12} = (1/q) M + \rho D U M \quad (3.55)$$

$$P_{22} = M + \mu M U M$$

elde edilir. Burada ρ , negatif olmayan bir skaler ve U , bütün elemanları 1 olan $n \times n$ bir matristir. (3.55) ifadeleri (3.52)'de kullanılırsa

$$2(D - M/q) + (\mu - \rho)(DUM + MUD) \geq 0 \quad (3.56)$$

bulunur. (3.56) eşitsizliğinin sağlanması için aşağıdaki eşitsizlik $\mu' = \mu - \rho$ olmak üzere gerçekleşmelidir:

$$(\mu')^2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{(d_i m_j - d_j m_i)^2}{4(d_i - m_i/q)(d_j - m_j/q)} - \mu' \sum_{i=1}^n \frac{d_i m_i}{d_i - m_i/q} - 1 \leq 0 \quad (3.57)$$

Generatörlerin sönüm momentleri üniform ($m_i/d_i = \text{st.}$) ise μ' , μ_o 'a dönüşür[23].

$$\mu_o = -1 / \left[\sum_{i=1}^n m_i d_i / (d_i - m_i/q) \right] \quad (3.58)$$

$W_2(s)$ transfer matrisi yeniden yazılırsa

$$W_2(s) = C_2^T (sI - A_2)^{-1} B_2 \quad (3.59)$$

$$A_2 = -\alpha_{nn} \quad , \quad B_2 = \beta_{nn} \quad , \quad C_2 = I_{nn} \quad (3.60)$$

olur. $Z_2(s)$ pozitif reel olduğundan, $Z_2(s) + Z_2^T(-s)$ aşağıdaki biçimde çarpanlarına ayrılabilir:

$$Z_2(s) + Z_2^T(-s) = Y_2^T(-s) Y_2(s) \quad (3.61)$$

$$Y_2(s) = \text{köşegen} \left(\frac{s\sqrt{2\beta_i}}{s + \alpha_i} \right) \quad (3.62)$$

(3.44)'ün çözülmesiyle L_2 elde edilir:

$$L_2 = -\text{köşegen} (\sqrt{2} \alpha_i / \sqrt{\beta_i}) \quad (3.63)$$

Öte yandan

$$P_2 A_2 + A_2^T P_2 = -L_2 L_2^T \quad (3.64)$$

yazılabilir. (3.64)'ün (3.60) ve (3.63) yardımıyla çözülmesi sonucu

$$P_2 = \alpha \beta^{-1} \quad (3.65)$$

elde edilir. Böylece P_1 , P_2 ve dolayısıyla P matrisi bulunmuş olur.

3.3.4. Liapunov Fonksiyonu

Liapunov fonksiyonu (3.25), (3.55) ve (3.65) ifadelerinin (3.42) de yerine konulmasıyla elde edilir:

$$\begin{aligned}
 V(x) &= [\delta_r^T \quad w^T \quad \Delta E^T] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_r \\ w \\ \Delta E \end{bmatrix} + 2V_1(\sigma) \\
 &= \delta_r^T P_{11} \delta_r + 2\delta_r^T P_{12} w + w^T P_{22} w + \Delta E^T P_2 \Delta E + 2V_1(\sigma) \\
 &= \delta^T (D/q + \rho DUD) \delta + 2\delta^T (M/q + \rho DUM) w \\
 &\quad + w^T (M + \mu MUM) w + \Delta E^T \alpha \beta^{-1} \Delta E + 2V_1(\sigma) \quad (3.66)
 \end{aligned}$$

Liapunov fonksiyonu elde edildiğine göre, artık $q \rightarrow \infty$ yapılabilir. (3.35) ifadesi (3.66) da yerine konulur ve yeniden düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned}
 V(x) &= (1/2 \sum_{i=1}^n m_i) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_i m_j (w_i - w_j)^2 \\
 &\quad + (\mu' - \mu_0) \left(\sum_{i=1}^n m_i w_i \right)^2 \\
 &\quad + \rho \left\{ \sum_{i=1}^n [d_i (\delta_i - \delta_i^0) + m_i w_i] \right\}^2 \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n (\alpha_i / \beta_i) (E_i - E_i^0)^2 \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} [E_i E_j (\cos \delta_{ij}^0 - \cos \delta_{ij}) \\
 &\quad - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^0) E_i^0 E_j^0 \sin \delta_{ij}^0] \quad (3.67)
 \end{aligned}$$

(3.58) bağıntısında $q \rightarrow \infty$ yapılırsa

$$\mu_0 = -1 / \sum_{i=1}^n m_i \quad (3.68)$$

olur. (3.67)'nin birinci ve ikinci terimleri kinetik enerjidir. Sönüm momentleri üniform ise $\mu'=\mu_0$ olur ve ikinci terim sıfıra gider. Üçüncü terimdeki ρ , keyfi seçilen ve negatif olmayan bir sabittir, sıfır alınabilir. Dördüncü terim akı değişimini simgeler. Akı sabit alınırsa bu terim gözükmez. Beşinci terim, rotor açılarının kararlı denge noktalarından sapmaları nedeniyle sistemde biriken potansiyel enerjidir. Potansiyel enerji, sistemin geçici hal kararlılık bölgesinin tanımlanmasında önemli bir rol oynar.

Sönüm momentleri üniform veya sıfır ise (3.67) ifadesi (3.69)'a dönüşür.

$$\begin{aligned}
 V(x) &= (1/2) \sum_{i=1}^n m_i \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n m_i m_j (w_i - w_j)^2 \\
 &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} [E_i E_j (\cos \delta_{ij}^0 - \cos \delta_{ij}) - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^0) E_i^0 E_j^0 \sin \delta_{ij}^0] \\
 &+ \sum_{i=1}^n (\alpha_i / \beta_i) (E_i - E_i^0)^2 \\
 &= V_k(w) + V_p(\delta, E) + V_f(E)
 \end{aligned} \tag{3.69}$$

V_k , V_p ve V_f nin zamana göre türevleri alınır

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_k}{dt} &= -(1/2) \sum_{i=1}^n d_i \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n d_i d_j (w_i - w_j)^2 \\
 &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} (E_i^0 E_j^0 \sin \delta_{ij}^0 - E_i E_j \sin \delta_{ij}) (w_i - w_j)
 \end{aligned} \tag{3.70}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_p}{dt} &= - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} (E_i^0 E_j^0 \sin \delta_{ij}^0 - E_i E_j \sin \delta_{ij}) (w_i - w_j) \\
 &+ 2 \sum_{i=1}^n (dE_i / dt) \sum_{j=1}^n B_{ij} E_j (\cos \delta_{ij}^0 - \cos \delta_{ij})
 \end{aligned} \tag{3.71}$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_f}{dt} = & -2 \sum_{i=1}^n (dE_i/dt) \sum_{j=1}^n B_{ij} E_j (\cos \delta_{ij}^0 - \cos \delta_{ij}) \\ & -2 \sum_{i=1}^n (1/\beta_i) (dE_i/dt)^2 \end{aligned} \quad (3.72)$$

bulunur. (3.70)'in birinci terimi sönüm momentleri nedeniyle vardır ve pozitif değildir. Kinetik enerjinin bir kısmı sönüm momentleri tarafından harcanır. (3.70)'in ikinci terimi ile (3.71)'in birinci terimi aynı büyüklükte fakat zıt işaretlidirler ve kinetik enerji ile potansiyel enerji arasındaki enerji dönüşümü anlamındadırlar. Bu yüzden bu terimler V'nin azalmasına katkıda bulunmazlar. Benzer biçimde, (3.71)'in ikinci terimi ile (3.72)'nin birinci terimi aynı büyüklükte ve zıt işaretlidirler. V_p ile V_f arasında da bir enerji dönüşümü vardır. (3.72)'nin ikinci terimi (dE_i/dt) nin karesiyle orantılı olduğundan bu terim pozitif değildir. Böylece V'nin zamana göre türevi

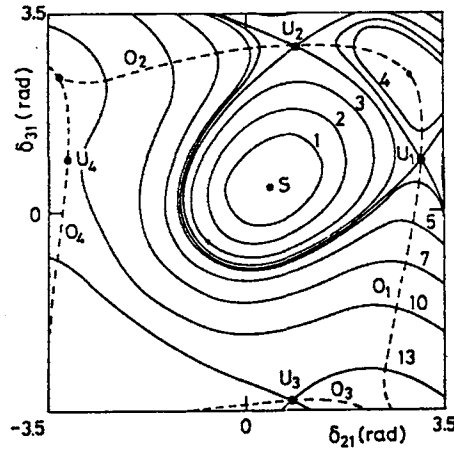
$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -(1 / \sum_{i=1}^n d_i) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_i d_j (w_i - w_j)^2 \\ & -2 \sum_{i=1}^n (1/\beta_i) (dE_i/dt)^2 \end{aligned} \quad (3.73)$$

olur.

3.4. Geçici Hal Kararlılık Bölgesi

$V_1(\sigma)$, sadece kararlı denge noktası çevresindeki sonlu bir bölgede pozitif olduğundan, güç sistemi geniş anlamda kararlı değildir. Bununla birlikte, elde edilen Liapunov fonksiyonu, bölge kestiriminde kullanılabilir. Bulunan Liapunov fonksiyonu, bir kaç fark dışında basit sistem modelleri için elde edilen fonksiyona benzerdir[7]. Basit sistem için Liapunov fonksiyonu ve bunun geniş bölge kestirimi düşünüldüğünde, burada akı ile orantılı iç generatör geriliminin parametre olarak alınması, basit

sistemler için izlenen yoldan geçici hal kararlılık bölgesinin tanımlanmasında oldukça uygundur [15] .



Şekil 3.3. 3-makinalı bir sistem için eşpotansiyel eğrileri ($E_1=E_2=E_3=1.0$ p.u.)

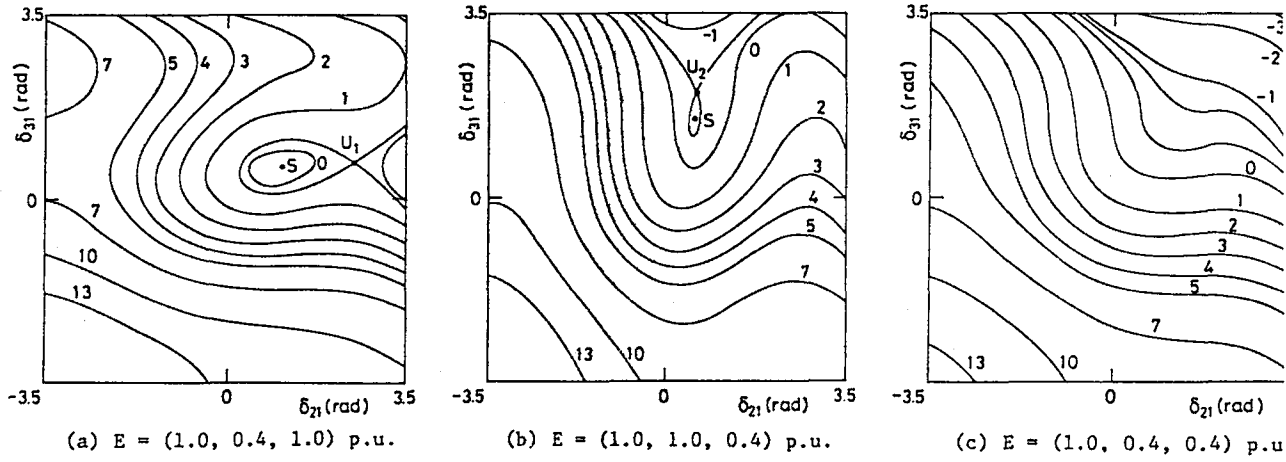
Şekil 3.3'de 3-makinalı bir güç sistemi için açı farkları düzleminde çizilen eşpotansiyel eğrileri görülmektedir. Potansiyel enerji S noktasında en küçük değerini almaktadır. U_1 , U_2 , U_3 ve U_4 noktaları, eyer noktalarıdır. Eşpotansiyel eğrileri

$$V_p(\delta, E) = C_i, \quad i=1,2,\dots \quad (3.74)$$

ile verilir. Burada C_i ler sabittir. E ise parametre olarak alınmaktadır. O_1 , O_2 , O_3 ve O_4 eğrileri eşpotansiyel eğrilere diktir ve U_1 , U_2 , U_3 ve U_4 noktalarından geçerler. Sisteme uygulanan toplam moment

$$T = - \frac{\partial V}{\partial \delta_r} \quad (3.75)$$

ile verilir. δ_r , $(n-1)$ boyutlu ve birinci generatöre göre bağıl açı vektörüdür. Ayrıca, momentin yönü her zaman eşpotansiyel eğrilere diktir. T momenti, sistemi O_x eğrilerinin dışına çıkardığında senkronizma kaybolacaktır. Geçici hal kararlılık bölgesi, O_x eğrileriyle sınırlanan bölge olarak tanımlanır.



Şekil 3.4. Eşpotansiyel eğrilerin iç gerilimle değişimi

Kararlılık bölgesi iç gerilimle değişir. Şekil 3.4'de şekil 3.3'deki sistem için eşpotansiyel eğrilerin, iç gerilimlerin bazı değerlerinde nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 3.4(a) da $E_2=0.4$ p.u. ve $E_1=E_3=1.0$ p.u' dur. Sadece U_1 noktası gözükmektedir. U_1 'den geçen eşpotansiyel eğri tarafından kuşatılan bölge dardır. Bu yüzden küçük bir hata 2.generatörü senkronizmadan çıkarır. Şekil 3.4(b) de $E_3=0.4$ p.u. ve $E_1=E_2=1.0$ p.u. dur. Bu durumda sadece U_2 noktası gözükmektedir. U_2 den geçen eşpotansiyel eğrinin kuşattığı bölge çok dardır ve her küçük hatada 3.generatör senkronizmadan çıkar. Şekil 3.4(c) de $E_1=1.0$ p.u. ve $E_2=E_3=0.4$ p.u. dur. Bu durumda kararlılık bölgesi yoktur ve sistem artık kararlı kalamaz.

Şekil 3.4(a) ve (b) de gösterildiği gibi, bazı iç gerilimler azaldığında geçici hal kararlılık bölgesi değişmektedir ve iç gerilimi azalan generatörün küçük bir hatada kolayca senkronizmadan çıkacağı gözlenmektedir. Genel Liapunov yönteminde eyer noktalarının birindeki V_p değeri, V 'nin kritik değeri olarak kullanılır. Eyer noktası iç gerilimle değiştiği için V_c ile gösterilen kritik değer de değişir. V_c 'nin zamana göre türevi

$$\frac{dV_c}{dt} = \left(\frac{\partial V_p}{\partial E} \right)^T_{\delta=\delta_u} \frac{dE}{dt} \quad (3.76)$$

olarak tanımlanır. Eyer noktasında

$$\frac{\partial V_p}{\partial \delta_r} = 0 \quad (3.77)$$

olmaktadır. Bu yüzden (3.76) ifadesinde, bununla ilgili terim gözükmez. Geçici hal kararlılık bölgesinin tanımından, V_c ile $V_k + V_p$ karşılaştırılmalıdır. $V_p + V_k$ nın zamanına göre türevi

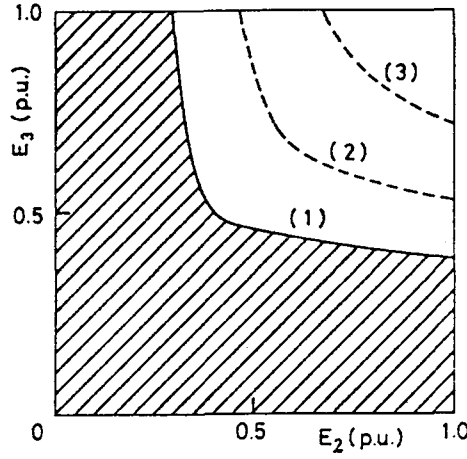
$$\frac{d(V_p + V_k)}{dt} = \left(\frac{\partial V_p}{\partial E} \right)^T_{\delta=\delta} \frac{dE}{dt} \quad (3.78)$$

olarak yazılabilir. Burada sönüm momentleri ihmal edilmiştir. (3.76) dan (3.78)'i çıkararak

$$\frac{d[V_c - (V_p + V_k)]}{dt} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{dE_i}{dt} \right) \sum_{j=1}^n B_{ij} E_j (\cos \delta_{ij}^u - \cos \delta_{ij}) \quad (3.79)$$

ifadesi elde edilir. Burada "u" eyer noktası anlamındadır. (3.79)'un sağ yanı pozitif ise V_c 'nin azalması $(V_p + V_k)$ 'nin azalmasından daha küçüktür. Bu durumda sorun yoktur. Ama eğer (3.79)'un sağ yanı negatif ise V_c , $(V_p + V_k)$ 'dan daha hızlı azalır. $(V_p + V_k)$, V_c ye ulaştığında hata temizlenirse V_c , $(V_p + V_k)$ 'dan daha küçük olacaktır ve sistem senkronizmadan çıkacaktır.

Şekil 3.4(c) de gösterildiği gibi, geçici hal kararlılık bölgesinin var olabilmesi için iç gerilimler belirli bir bölgede değer almalıdır. Şekil 3.5 aynı sistem için bazı iç gerilim bölgelerini göstermektedir.



Şekil 3.5. Kararlılık bölgesinin var olabilmesi için bazı iç gerilim bölgeleri

Şekil 3.5'deki taralı bölgede geçici hal kararlılık bölgesi varolamaz. İç gerilim çok azalır ve bu değerler taralı bölge içinde ise kararlılık bölgesi sıfırdır ve sistem senkronizmadan çıkar. Kesikli çizgiler, elektriksel çıkış güçleri P_2 ve P_3 'ün arttığı durumlardaki sınırları göstermektedir. P_2 ve P_3 'deki artmaya göre taralı alan genişler ve iç gerilimlerdeki küçük bir azalma kararlılık bölgesinin daralmasına ve bu da senkronizmin kaybına neden olur.

3.5. Liapunov Fonksiyonunun Kritik Değerinin Saptanması

Kritik arıza temizleme süresinin belirlenmesi, V' nin kritik değerinin belirlenmesine bağlıdır. Birinci salınının kararsızlığına karşı düşen kritik açı δ_{uc} olsun. V_{uc} , V_p 'nin δ_{uc} 'deki değeri olmak üzere

$$V < V_{uc} \quad (3.80)$$

ise sistem birinci salınım için kararlıdır. V_{uc} , kritik değer olarak kullanılabilir[19]. Bununla birlikte sistem, δ_{uc} 'den geçmeden de kararlılık bölgesi sınırının herhangi bir noktasından dışarı çıkabilir.

BÖLÜM 4. UYGULAMA

4.1. Giriş

Bundan önceki bölümlerde Liapunov teorisi ve Liapunov'un ikinci yönteminin güç sistemlerinin geçici hal kararlılık analizinde kullanılması incelendi. Bu bölümde, kritik arıza temizleme süresinin Liapunov yöntemiyle belirlenebilmesi için gerekli algoritma geliştirilecektir.

4.2. Newton-Raphson Yöntemi

Lineer olmayan cebrik denklem takımlarının sayısal çözümleri "Newton-Raphson" yöntemi ile elde edilebilir. Bu yöntem, aşağıdaki biçimde açıklanabilir [2,4]:

$$f_i(x_i) = 0, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.1)$$

lineer olmayan cebrik denklem takımı, x_i^0 ilk koşullarıyla Taylor serisine açılıp yüksek dereceli terimler ihmal edilirse, sayısal çözüm için uygun bir biçime ulaşılır.

$$x_i = x_i^0 + \Delta x_i^0, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.2)$$

(4.2) ifadei (4.1)'de kullanıldığında

$$f_i(x_i^0 + \Delta x_i^0) = 0, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.3)$$

yazılabilir. (4.3) fonksiyonları x_i^0 civarında Taylor serisine açılabilir:

$$f_i(x_i) \cong f_i(x_i^0) + \left[\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right)^0 \Delta x_1^0 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right)^0 \Delta x_2^0 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right)^0 \Delta x_n^0 \right] \cong 0$$
$$i=1,2,\dots,n \quad (4.4)$$

(4.4) ifadesi matrisel biçimde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} f_1^0 \\ f_2^0 \\ \vdots \\ f_n^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.5)$$

(4.5) ifadesi kısaca

$$f^0 + J^0 \Delta x^0 \cong 0 \quad (4.6)$$

ile verilir. Buradaki J' 'ye "Jakobiyen matrisi" denir. (4.6) dan Δx^0 çözülürse

$$\Delta x^0 = (J^0)^{-1} (-f^0) \quad (4.7)$$

bulunur ve buradan

$$x_i^1 = x_i^0 + \Delta x_i^0, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.8)$$

ile, (4.1) denklemleri gerçekleşene kadar işlemlere devam edilir. (4.8)'in genel biçimi

$$x_i^{r+1} = x_i^r + \Delta x_i^r, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.9)$$

ile verilebilir. İşlemler, (4.1) denklemleri, istenen çözümün hassaslık derecesine göre seçilen bir toleransla sağlandığında kesilir. Yani, ε sıfır civarında istenen hassaslığa göre seçilen pozitif bir sabit olmak üzere

$$|f_i(x_i^r)| < \varepsilon, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.10)$$

ifadesi sağlandığında x_i^r çözümleri bulunmuş olur.

4.2.1. Yük Akışı

Kararlılık analizinde, ilk koşulları ve generatör mekanik güçlerini belirleyebilmek amacıyla, arıza öncesi yük akışı çalışmasının yapılması gereklidir.

Yük akışı problemi, kararlılık analizinde kullanıldığı kadarıyla arıza öncesinde bara güç ve gerilimlerini bulmaktan ibarettir. Formülasyonu oluşturabilmek amacıyla p.baraadaki net güç

$$P_p + jQ_p = \dot{V}_{tp} \dot{I}_p^* \quad , \quad p=1,2,\dots,n \quad (4.11)$$

olsun. Burada P_p ve Q_p sırasıyla p.baranın aktif ve reaktif güçleri, $\dot{V}_{tp}$ ve $\dot{I}_p$ de p.baranın gerilim ve akım fazörüdür. "*" işareti "kompleks eşlenik" anlamındadır. (4.11) denklemi, her iki yanın eşleniği alındığında

$$P_p - jQ_p = \dot{V}_{tp}^* \dot{I}_p \quad , \quad p=1,2,\dots,n \quad (4.12)$$

biçiminde de ifade edilebilir. Şebeke modeli matrisel olarak

$$\dot{I}_B = \dot{Y}_B \dot{V}_{tB} \quad (4.13)$$

ile verilir. Burada $\dot{I}_B$ bara akımları vektörü, $\dot{V}_{tB}$ bara gerilimleri vektörü ve $\dot{Y}_B$ de bara admitans matrisidir. (4.13) ifadesi (4.12)'de kullanıldığında

$$P_p - jQ_p = \dot{V}_{tp}^* \sum_{q=1}^n \dot{Y}_{pq} \dot{V}_{tq} \quad , \quad p=1,2,\dots,n \quad (4.14)$$

yazılabilir. $\dot{V}_{tp}$ ve $\dot{Y}_{pq}$ 'nin açık biçimi şöyledir:

$$\dot{V}_{tp} = e_p + jf_p \quad p=1,2,\dots,n \quad , \quad q=1,2,\dots,n \quad (4.15)$$

$$\dot{Y}_{pq} = G_{pq} + jB_{pq}$$

(4.15) ifadeleri (4.14)'de kullanılırsa

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \sum_{q=1}^n (G_{pq} + jB_{pq})(e_q + jf_q) , p=1,2,\dots,n \quad (4.16)$$

ayrıca, reel ve imajiner kısımlar eşitlenirse

$$P_p = \sum_{q=1}^n [e_p(e_q G_{pq} - f_q B_{pq}) + f_p(f_q G_{pq} + e_q B_{pq})] \quad p=1,2,\dots,n \quad (4.17)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n [f_p(e_q G_{pq} - f_q B_{pq}) - e_p(f_q G_{pq} + e_q B_{pq})]$$

bulunur.

Yük akışı analizinde baralardaki planlanan güçlerin tutturulabilmesi için bara gerilim değerleri hesaplanır. Hesap sırasında bir bara referans seçilir ve bunun gerilimi baştan sona sabit alınır. Bu yüzden (4.5) denklemleri, 1.bara referans seçilirse

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial e_n} & \bigg| & \frac{\partial P_2}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial f_n} \\ \vdots & & \vdots & \bigg| & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial e_n} & \bigg| & \frac{\partial P_n}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial f_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial e_n} & \bigg| & \frac{\partial Q_2}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial f_n} \\ \vdots & & \vdots & \bigg| & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial e_n} & \bigg| & \frac{\partial Q_n}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial f_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta e_3 \\ \vdots \\ \Delta e_n \\ \hline \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \vdots \\ \Delta f_n \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

olarak referans barayı içermez. Referans baranın güçleri analiz sonunda ayrıca hesap edilir. Burada ilk koşul olarak gerilimlerin anma değerlerinin seçilmesi uygundur.

(4.18) Jakobiyen matrisindeki türev ifadeleri, (4.17) den analitik olarak hesap edilir[2,4].

$$\Delta P_p^r = P_p^{pl} - P_p^r$$

$$p=2,3,\dots,n \quad (4.19)$$

$$\Delta Q_p^r = Q_p^{pl} - Q_p^r$$

ΔP_p^r ve ΔQ_p^r değerleri öngörülen tolerans içindeyse çözüm bulunmuştur. Aksi halde

$$e_p^{r+1} = e_p^r + \Delta e_p^r$$

$$p=2,3,\dots,n \quad (4.20)$$

$$f_p^{r+1} = f_p^r + \Delta f_p^r$$

alınarak, hesaplara

$$|\Delta P_p^r| < \epsilon$$

$$p=2,3,\dots,n \quad (4.21)$$

$$|\Delta Q_p^r| < \epsilon$$

oluncaya kadar devam edilir.

4.2.2. Arıza Sonrası Kararlı Denge Noktaları

(3.18) denklemleri ile ifade edilen sistemin arıza sonrası kararlı denge noktaları

$$f_i = P_{mi} - \sum_{j=1}^n B_{ij} E_i E_j \sin \delta_{ij} = 0$$

$$i=1,2,\dots,n \quad (4.22)$$

$$g_i = E_{fdi} - E_i - (x_{di} - x'_{di}) \sum_{j=1}^n B_{ij} E_j \cos \delta_{ij} = 0$$

denklemleri çözülerek bulunabilir. (4.22) denklemleri (4.5)'e uygulanırsa

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \\ \hline g_1 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial f_1}{\partial E_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial E_n} \\ \vdots & & \vdots & | & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial f_n}{\partial E_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial E_n} \\ \hline \frac{\partial g_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial g_1}{\partial E_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial E_n} \\ \vdots & & \vdots & | & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial g_n}{\partial E_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial E_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \hline \Delta E_1 \\ \vdots \\ \Delta E_n \end{bmatrix} = 0 \quad (4.23)$$

elde edilir. Burada ilk koşul olarak yük akışından bulunan sonuçlar kullanılır. (4.7) deki gibi birinci çözümler bulunur ve genel biçimde

$$\delta_i^{r+1} = \delta_i^r + \Delta \delta_i^r$$

$$i=1,2,\dots,n \quad (4.24)$$

$$E_i^{r+1} = E_i^r + \Delta E_i^r$$

alınarak, hesaplara

$$|f_i^r| < \epsilon$$

$$i=1,2,\dots,n \quad (4.25)$$

$$|g_i^r| < \epsilon$$

oluncaya kadar devam edilir. (4.25) eşitsizlikleri sağlandığında çözüm bulunmuş olur.

Jakobiyen matrisindeki türev ifadeleri, (4.22)'den analitik olarak hesaplanabilir:

$$\frac{\partial f_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} E_i E_j \cos \delta_{ij} , \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \delta_j} = B_{ij} E_i E_j \cos \delta_{ij} , \quad i \neq j , \quad i=1,2,\dots,n \\ j=1,2,\dots,n \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial E_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} E_j \sin \delta_{ij} , \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial E_j} = -B_{ij} E_i \sin \delta_{ij} , \quad i \neq j , \quad i=1,2,\dots,n \\ j=1,2,\dots,n \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial \delta_i} = (x_{di} - x'_{di}) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} E_j \sin \delta_{ij} , \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial \delta_j} = -(x_{di} - x'_{di}) B_{ij} E_j \sin \delta_{ij} , \quad i \neq j , \quad i=1,2,\dots,n \\ j=1,2,\dots,n \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial E_i} = -1 - (x_{di} - x'_{di}) B_{ii} , \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial E_j} = -(x_{di} - x'_{di}) B_{ij} \cos \delta_{ij} , \quad i \neq j , \quad i=1,2,\dots,n \\ j=1,2,\dots,n \quad (4.33)$$

4.3. Arıza Öncesinde İç Generatör Gerilimleri

Şekil 3.2'den hareketle iç generatör gerilimine ilişkin fazör denklemi

$$E_p / \delta_p = \dot{V}_{tp} + jx'_{dp} \dot{I}_p, \quad p=1,2,\dots,n \quad (4.34)$$

biçiminde yazılabilir. (4.12)'den (4.15) kullanılarak $\dot{I}_p$ çözümlürse

$$\dot{I}_p = \frac{P_p - jQ_p}{e_p - jf_p}, \quad p=1,2,\dots,n \quad (4.35)$$

ve (4.35) ile (4.15) ifadeleri (4.34) de yerine konursa

$$E_p / \delta_p = \frac{e_p^2 - f_p^2 - x'_{dp} (f_p P_p - e_p Q_p)}{e_p^2 + f_p^2} + j \frac{2e_p f_p + x'_{dp} (e_p P_p + f_p Q_p)}{e_p^2 + f_p^2}, \quad p=1,2,\dots,n \quad (4.36)$$

bulunur. Böylece E_p ve δ_p 'ler belirlenmiş olur.

4.4. Bara Admitans Matrislerinin İndirgenmesi

İşlemlerin kolayca yapılabilmesi için arıza öncesi, sırası ve sonrasında bara admitans matrislerinin ayrı ayrı indirgenmeleri gerekir. Bundan amaç, generatör baraları dışındaki baraları yok etmektir. İndirgeme işlemi matrisel olarak aşağıdaki biçimde yapılır[3]:

(4.13) bağıntısında generatör baraları diğer baralardan ayrılırsa, n generatör sayısı ve m de toplam bara sayısı ise

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{nx1} \\ 0_{(m-n)x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{nxn}^{(1)} & \dot{Y}_{nx(m-n)}^{(2)} \\ \dot{Y}_{(m-n)xn}^{(3)} & \dot{Y}_{(m-n)x(m-n)}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{nx1} \\ \dot{V}_{(m-n)x1} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

yazılabilir. (4.37)'den $\dot{V}_{(m-n)x1}$ yok edilirse

$$[\dot{I}_{nx1}] = \{\dot{Y}_{nxn}^{(1)} - \dot{Y}_{nx(m-n)}^{(2)} [\dot{Y}_{(m-n)x(m-n)}^{(4)}]^{-1} \dot{Y}_{(m-n)xn}^{(3)}\} [\dot{V}_{nx1}] \quad (4.38)$$

bulunur. Böylece

$$\dot{I} = \dot{Y}\dot{V} \quad (4.39)$$

formundaki yeni şebeke modeli elde edilir. Buradaki $\dot{Y}$, nxn boyutlu, indirgenmiş admitans matrisidir.

4.5. Generatör Mekanik Güçleri

Generatörlere ait mekanik giriş güçlerinin, arıza öncesi, sırası ve sonrasında, sabit kabul edilmesi alışılmış bir varsayımdır. Mekanik olaylarda zaman sabitleri, elektriksel olaylardakine göre oldukça büyük olduğundan bu varsayım, gerçeğe çok yakındır.

Mekanik güçler, arıza öncesi denge durumunda

$$P_{mi} = P_{eio}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.40)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Bara admitans matrisi indirgendikten sonra Bölüm 4.3'deki gibi elde edilen iç gerilim ve açılar yardımı ile (3.16) denkleminde yararlanarak, mekanik güçler

$$P_{mi} = \sum_{j=1}^n B_{ij} E_i E_j \sin \delta_{ij}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.41)$$

bulunur.

4.6. Düzeltilmiş Euler Yöntemi

Lineer olmayan diferansiyel denklemlerin sayısal çözümleri "Düzeltilmiş Euler" yöntemi ile elde edilebilir. Bu yöntem, aşağıdaki biçimde açıklanabilir [2,3,4]:

$$\dot{x} = f(x) \quad (4.42)$$

şeklinde, lineer olmayan bir diferansiyel denklem düşünelim. t_0 , x_0 için durum değişkenindeki artım

$$\Delta x_0 = f(x_0) \Delta t \quad (4.43)$$

olur. t_1 anındaki durum değişkeni

$$x_1 = x_0 + \Delta x_0 \quad (4.44)$$

bulunur. Bu yöntemde, t zaman aralıklarının başlangıçlarındaki türevlerinden hareketle durum değişkenlerinin değerleri, adı geçen zaman aralıklarının sonlarında hesap edilir. Bu nedenle hata sözkonusu olur. Bu hatadan kurtulmak için türevin ortalama değeri gözönüne alınır.

$$f(x_0)_{\text{ort}} = \frac{1}{2} [f(x_1) + f(x_0)] \quad (4.45)$$

böylece t_1 anındaki yeni durum değişkeni

$$x_{y1} = x_0 + f(x_0)_{\text{ort}} \Delta t \quad (4.46)$$

bulunur. Her Δt zaman aralığı için bu işleme devam edilirse t_r anında genel bağıntılar

$$x_{r+1}^y = x_r^y + f(x_r^y) \Delta t \quad (4.47)$$

$$x_{r+1}^y = x_r^y + \frac{1}{2} [f(x_r^y) + f(x_{r+1}^y)] \Delta t \quad (4.48)$$

olarak bulunur.

Bu tezde gözönüne alınan pratik yöntemde göre, Liapunov fonksiyonunun kritik değerinin bulunabilmesi için, arıza sırasında (3.20) denklemlerinin, (dV_k/dt) nin işareti değişinceye kadar sayısal çözümü gerekmektedir. Bu denklemlerin çözülebilmesi için, w_0 sürekli haldeki açısal hız olmak üzere,

$$\frac{dw_i}{dt} = \frac{1}{m_i} [P_{mi} - d_i(w_i - w_o) - \sum_{j=1}^n E_i E_j \sin \delta_{ij}] ,$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{T'_{doi}} [E_i^o - E_i - (x_{di} - x'_{di}) \sum_{j=1}^n B_{ij} (E_j^o \cos \delta_{ij}^o - E_j \cos \delta_{ij})] \quad (4.49)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i - w_o , \quad i=1,2,\dots,n$$

formuna dönüştürmeleri gerekir. Açıklamayı kolaylaştırmak için (4.49) denklemlerinin

$$\dot{w}_i = f_i(w_i, E_i, \delta_i)$$

$$\dot{E}_i = g_i(E_i, \delta_i) , \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.50)$$

$$\dot{\delta}_i = w_i - w_o$$

biçimine dönüştürülmesi uygundur. Çözüm için arıza öncesi yük akışı sonuçları, ilk koşul olarak uygulanabilir. t_o anında

$$\Delta w_{io} = f_i(w_{io}, E_{io}, \delta_{io}) \Delta t \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.51)$$

$$\Delta E_{io} = g_i(E_{io}, \delta_{io}) \Delta t$$

olur. Burada $w_{io} = w_o$ dir. t_1 anında

$$w_{i1} = w_{io} + \Delta w_{io}$$

$$E_{i1} = E_{io} + \Delta E_{io} , \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.52)$$

$$\delta_{i1} = \delta_{io} + \frac{1}{2} (w_{io} + w_{i1} - 2w_o) \Delta t$$

olmaktadır. (4.52) ile bulunan değerlerden yararlanarak, t_1 anındaki yeni durum değişkenleri

$$\begin{aligned}
 w_{i1}^y &= w_{i0} + \frac{1}{2} [f_i(w_{i0}, E_{i0}, \delta_{i0}) + f_i(w_{i1}, E_{i1}, \delta_{i1})] \Delta t \\
 E_{i1}^y &= E_{i0} + \frac{1}{2} [g_i(E_{i0}, \delta_{i0}) + g_i(E_{i1}, \delta_{i1})] \Delta t \\
 \delta_{i1}^y &= \delta_{i0} + \frac{1}{2} [w_{i0} + w_{i1}^y - 2w_0] \Delta t \\
 & i=1,2,\dots,n
 \end{aligned} \tag{4.53}$$

bulunur. Böylece t_r anında genel bağıntılar, ilk değerler

$$\begin{aligned}
 w_{i(r+1)} &= w_{ir}^y + f_i(w_{ir}^y, E_{ir}^y, \delta_{ir}^y) \Delta t \\
 E_{i(r+1)} &= E_{ir}^y + g_i(E_{ir}^y, \delta_{ir}^y) \Delta t, \quad i=1,2,\dots,n \\
 \delta_{i(r+1)} &= \delta_{ir}^y + \frac{1}{2} (w_{ir}^y + w_{i(r+1)} - 2w_0) \Delta t
 \end{aligned} \tag{4.54}$$

ve yeni değerler

$$\begin{aligned}
 w_{i(r+1)}^y &= w_{ir}^y + \frac{1}{2} [f_i(w_{ir}^y, E_{ir}^y, \delta_{ir}^y) + f_i(w_{i(r+1)}, E_{i(r+1)}, \delta_{i(r+1)})] \Delta t \\
 E_{i(r+1)}^y &= E_{ir}^y + \frac{1}{2} [g_i(E_{ir}^y, \delta_{ir}^y) + g_i(E_{i(r+1)}, \delta_{i(r+1)})] \Delta t \\
 \delta_{i(r+1)}^y &= \delta_{ir}^y + \frac{1}{2} [w_{ir}^y + w_{i(r+1)}^y - 2w_0] \Delta t \quad i=1,2,\dots,n
 \end{aligned} \tag{4.55}$$

olarak bulunur.

Sayısal çözümün her Δt zaman aralıklarında (3.70) ifadesine göre (dV_k/dt) 'nin işareti kontrol edilir ve negatiften pozitifte değiştiği anda çözüm işlemi kesilerek ve (3.69)'dan V_p değeri hesaplanarak Liapunov fonksiyonunun kritik değeri bulunmuş olur. Ayrıca bu ana kadar geçen zaman, kritik arıza temizleme süresidir.

4.7. Bilgisayar Programı

Bu bölümde anlatılanlar ışığında kritik arıza temizleme süresi, aşağıdaki adımlar gerçekleştirilerek, Liapunov'un ikinci yöntemiyle hesaplanmış olur.

1.adım: Arıza öncesi yük akışı analizi sonucunda generatör iç gerilim ve açıları hesaplanır.

2.adım: Arıza öncesi bara admitans matrisi indirgenir ve generatör mekanik güçleri bulunur.

3.adım: Arıza sonrası bara admitans matrisi indirgenir ve arıza sonrası kararlı denge noktaları belirlenir.

4.adım: Arıza sırası bara admitans matrisi indirgenir ve arıza sırasındaki sistem denklemlerinin sayısal çözümü yapılır.

5.adım: Her çözüm aşamasında (dV_k/dt) 'nin işareti kontrol edilir ve işaret pozitif döndüğünde sayısal çözüm durdurulur.

6.adım: 5.adımdaki t değeri, kritik arıza temizleme süresidir (t_{cr}).

7.adım: t_{cr} anındaki durum değişkenleri ile V_p hesaplanır. Bu değer Liapunov fonksiyonunun kritik değeridir.

Programda, bara admitans matrislerinin indirgenmesi aşamalarında bir kabul yapılmıştır. Bu kabul, admitans matrislerindeki iletkenliklerin, indirgeme işleminden önce ihmâl edilmesidir. Oysa daha hassas bir sonuç alabilmek için iletkenlikler, indirgeme işleminden sonra ihmâl edilmelidir. Bu yaklaşımın nedeni ise kullanılan Basic programlama dilinde kompleks matris işlemlerinin, özel-

likle köşegen elemanlar sıfır olduğu durumlarda (arıza sırası ve sonrasında bu durum yaşanmaktadır) çok güç olmasıdır.

Bu aşamalardan sonra geliştirilen program Ek-A'da verilmiş ve bir örnek problem çözülmüştür.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezin konusunu, güç sistemlerinde akı azalması da gözönüne alınarak Liapunov'un ikinci yöntemiyle geçici hal kararlılık analizi oluşturmaktadır.

Tezde, Popov kararlılık kriterinin akı değişmeli ve çok makinalı sistemler için genelleştirilmesi ve Lure tipi Liapunov fonksiyonunun kurulması, bazı literatürün paralelinde incelenmiştir. Bulunan Liapunov fonksiyonu, akının sabit alındığı sistemler için bulunan fonksiyondan, aşağıdaki farklarla ayrılır:

i) Potansiyel enerji, iç generatör gerilimlerini argüman olarak içerir.

ii) İç generatör gerilimlerinin değişimini büyüklük olarak simgeleyen V_f terimi, Liapunov fonksiyonunda gözükmemektedir.

iii) V 'nin sönüm değeri (dV/dt), iç generatör gerilimlerinin zamana göre türevinin karesi ile orantılıdır.

Geçici hal kararlılık bölgesi, iç generatör gerilimlerindeki azalmaya göre daralmaktadır. Burada, basit bir yöntemle bölge sınırı kestirilmekte ve kritik arıza temizleme süresi ile Liapunov fonksiyonunun kritik değeri hesaplanabilmektedir.

İletkenlikler ihmâl edilmez ise Liapunov fonksiyonunun düzeltilmesi gerekir. Genelleştirilmiş Popov kriteri, daha karmaşık sistemlere de uygulanabilir. Sözgelimi, otomatik gerilim regülatörlü ve uyarma sistemi dinamiğinin de hesaba katıldığı sistemler için bir inceleme

yapılabilir. Kontrol elemanları sistem modeline yansıtılırsa Liapunov'un ikinci yöntemi geçici hal kararlılık analizinde oldukça kullanışlıdır.

Tezin son bölümünde, verilen teori çerçevesinde kritik arıza temizleme süresini belirleyen bir bilgisayar programı geliştirilmiş ve bir örnek verilmiştir. İletkenlikler, bara admitans matrisleri indirgendikten sonra ih-mâl edilmelidir. Oysa geliştirilen programda iletkenlikler, başlangıçta ihmâl edilmiştir. Bunun nedeni, kullanılan "Basic" programlama dilinde kompleks işlemlerin yapılma zorluğudur.



KAYNAKLAR

- [1] TACER,M.E., Rotoru Bölmelenmiş Uyarma Sargılı Senkron Makinanın Sayısal Simülasyonu, Doçentlik Tezi, İ.T.Ü. 1981.
- [2] NAGRATH,I.J. and KOTHARI,D.P., Modern Power System Analysis, Tata McGraw Hill. 1989.
- [3] TACER,M.E., İki Uyarmalı Senkron Makinaların Analizi ve Kararlılığı, Doktora Tezi, İ.T.Ü. 1977.
- [4] STAGG,G.W. and EL-ABIAD,A.H., Computer Methods in Power System Analysis, McGraw Hill. 1968.
- [5] EL-ABIAD,A.H. and NAGAPPAN,K., Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems, IEEE Trans. Vol.PAS-85, No.2, 1966.
- [6] GLESS,G.E., Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability, IEEE Trans. Vol.PAS-85, No.2, 1966.
- [7] PAI,M.A., Power System Stability, North-Holland. 1981.
- [8] WILLEMS,J.L., Direct Methods for Transient Stability Studies in Power System Analysis, IEEE Trans. Vol.AC-16, No.4, 1971.
- [9] WILLEMS,J.L., Optimum Lyapunov Functions and Stability Regions for Multimachine Power Systems, Proc.IEEE, Vol.117, No.3, 1970.
- [10] PAI,M.A., MOHAN,M.A. and RAO,J.G., Power System Transient Stability Regions Using Popov's Method, IEEE Trans. Vol.PAS-89, May/June 1970.
- [11] ALBOSTAN,A., Liapunov'un İkinci Yöntemi ile Bir Güç Sisteminin Kararlılığının İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 1987.
- [12] BERGEN,A.R. and HILL,D.J., A Structure Preserving Model for Power System Stability Analysis, IEEE Trans. Vol.PAS-100, No.1, 1981.
- [13] MOORE,J.B. and ANDERSON,B.D.O., A Generalized of The Popov Criterion, J.Franklin Inst., Vol.285, No.6, 1968.

- [14] PAI, M.A. and RAI, V., Lyapunov-Popov Stability Analysis of Synchronous Machine with Flux-Decay and Voltage Regulator, Int.J.Control, Vol.19, No.4, 1974.
- [15] KAKIMOTO, N., OHSAWA, Y. and HAYASHI, M., Transient Stability Analysis of Multimachine Power Systems with Field Flux Decays Via Lyapunov's Direct Method, IEEE Trans. Vol.PAS-99, No.5, 1980.
- [16] KAKIMOTO, N., OHNOGI, Y., MATSUDA, H. and SHIBUYA, H., Transient Stability Analysis of Large-Scale Power System by Lyapunov's Direct Method, IEEE Trans. Vol.PAS-103, No.1, 1984.
- [17] SASAKI, H., An Approximate Incorporation of Field Flux Decay into Transient Stability Analysis of Multimachine Power Systems by The Second Method of Lyapunov, IEEE Trans. Vol.PAS-98, No.2, 1979.
- [18] PRABHAKARA, F.S. and EL-ABIAD, A.H., A Simplified Determination of Transient Stability Regions for Lyapunov Methods, IEEE Trans. Vol.PAS-94, No.2, 1975.
- [19] ATHAY, T., PODMORE, R. and VIRMANI, S., A Practical Method for The Direct Analysis of Transient Stability, IEEE Trans. Vol.PAS-98, No.2, 1979.
- [20] HSU, J.C. and MEYER, A.U., Modern Control Principles and Applications, McGraw Hill. 1968.
- [21] SARIOĞLU, K., Otomatik Kontrol II, 3.Baskı, İ.T.Ü., 1988.
- [22] ANDERSON, B.D.O., A System Theory Criterion for Positive Real Matrices, SIAM J.Control, Vol. 5, No.2, 1967.
- [23] PAI, M.A. and MURTHY, P.G., New Lyapunov Functions for Power Systems Based on Minimal Realization, Int.J.Control, Vol.19, No.2, 1974.

EK A

Aşağıda, Bölüm 4'de geliştirilen algoritmaya göre kritik arıza temizleme süresini hesaplayan program ve bir örnek verilmiştir.

```
10 REM          LIAPUNOV'UN 2.METODUYLA GECICI HAL KARARLILIK
20 REM          ANALIZI(KRITIK ARIZA TEMİZLEME SÜRESİNİN BULUNMASI)
30 CLS
40 INPUT "      BARA SAYISI:";N
50 INPUT "GENERATOR SAYISI:";N1
60 Z=2*N-1
70 Z1=2*N1;Z2=N-N1
80 DIM G(N,N),B(N,N),FILK(N),GILK(N),U(N),V(N),PP(N),QP(N)
90 DIM DP(N),DQ(N),TUR(Z,Z),DPQ(Z),DU(Z),DUR(N),DV(N)
100 DIM X(N1),X1(N1),TD(N1),M(N1),D(N1),EF(N1),E(N1),A(N1)
110 DIM F(N1),G1(N1),H(N1),FG(Z1),DA(Z1),DAR(N1),DE(N1),W(N1)
120 DIM BA(N1,N1),DW(N1),PM(N1),DWR(N1),C1(N1,N1),C2(N1,Z2)
130 DIM C3(Z2,N1),C4(Z2,Z2),A3(Z1),A2(Z1),A1(Z1),CD(N1,Z2),C(N1,N1)
140 PRINT "GENERATOR PARAMETRELERİNİ GIRIN"
150 FOR I=1 TO N1
160 LOCATE 6+I,1:PRINT "Xd(";I;")="
170 LOCATE 6+I,11:INPUT X(I)
180 LOCATE 6+I,30:PRINT "Xd'(";I;")="
190 LOCATE 6+I,42:INPUT X1(I)
200 LOCATE 7+I,1:PRINT "m(";I;")="
210 LOCATE 7+I,11:INPUT M(I)
220 LOCATE 7+I,30:PRINT "d(";I;")="
230 LOCATE 7+I,42:INPUT D(I)
240 LOCATE 8+I,1:PRINT "Tdo'(";I;")="
250 LOCATE 8+I,11:INPUT TD(I)
260 LOCATE 8+I,30:PRINT "Efd(";I;")="
270 LOCATE 8+I,42:INPUT EF(I)
280 CLS
290 NEXT I
300 REM          YUK AKISI
310 CLS
320 PRINT "ARIZA ÖNCESİ BARA ADMİTANS MATRİSİNİ GIRIN"
330 FOR I=1 TO N
340 FOR J=1 TO N
350 LOCATE 3+J,1:PRINT "G(";I;",";J;")="
360 LOCATE 3+J,12:INPUT G(I,J)
370 LOCATE 3+J,30:PRINT "B(";I;",";J;")="
380 LOCATE 3+J,41:INPUT B(I,J)
```

```
390 NEXT J
400 CLS
410 NEXT I
420 PRINT "ILK ANDA NET BARA GUCLERINI GIRIN (p.u.) "
430 PRINT
440 FOR I=2 TO N
450 LOCATE 3+I,1:PRINT "P(";I;")="
460 LOCATE 3+I,12:INPUT PILK(I)
470 LOCATE 3+I,30:PRINT "Q(";I;")="
480 LOCATE 3+I,41:INPUT QILK(I)
490 NEXT I
500 PRINT
510 PRINT "ILK TAHMIN GERILIMLERI(reel:u ,imajiner:v) ?"
520 PRINT "birinci bara referans(slack)"
530 FOR I=1 TO N
540 LOCATE 12+I,1:PRINT "u(";I;")="
550 LOCATE 12+I,9:INPUT "",U(I)
560 LOCATE 12+I,30:PRINT "v(";I;")="
570 LOCATE 12+I,39:INPUT "",V(I)
580 NEXT I
590 CLS
600 KA=0
610 FOR I=2 TO N
620 PP(I)=0
630 QP(I)=0
640 FOR J=1 TO N
650 PP(I)=PP(I)+U(I)*(U(J)*G(I,J)-V(J)*B(I,J))
        +V(I)*(V(J)*G(I,J)+U(J)*B(I,J))
660 QP(I)=QP(I)+V(I)*(U(J)*G(I,J)-V(J)*B(I,J))
        -U(I)*(V(J)*G(I,J)+U(J)*B(I,J))
670 NEXT J
680 NEXT I
690 FOR I=2 TO N
700 DP(I)=PILK(I)-PP(I)
710 DQ(I)=QILK(I)-QP(I)
720 NEXT I
730 MAKP=0
740 FOR I=2 TO N
750 IF ABS(DP(I))<=MAKP THEN GOTO 770
760 MAKP=ABS(DP(I))
770 NEXT I
780 MAKQ=0
790 FOR I=2 TO N
800 IF ABS(DQ(I))<=MAKQ THEN GOTO 820
810 MAKQ=ABS(DQ(I))
820 NEXT I
830 EPS=.01
840 IF MAKP<=EPS AND MAKQ<=EPS THEN GOTO 1880
850 REM *** JACOBIAN MATRIS HESABI ***
860 FOR I=2 TO N
870 FOR J=2 TO N
880 IF I<>J THEN GOTO 900
890 IF I=J THEN GOTO 920
```

```
900 TUR(I,J)=U(I)*G(I,J)+V(I)*B(I,J)
910 GOTO 980
920 TOP=0
930 FOR K=1 TO N
940 IF I=K THEN GOTO 960
950 TOP=TOP+U(K)*G(I,K)-V(K)*B(I,K)
960 NEXT K
970 TUR(I,J)=2*U(I)*G(I,I)+TOP
980 NEXT J
990 NEXT I
1000 FOR I=2 TO N
1010 FOR J=2 TO N
1020 IF I<>J THEN GOTO 1040
1030 IF I=J THEN GOTO 1060
1040 TUR(I,J+N-1)=-U(I)*B(I,J)+V(I)*G(I,J)
1050 GOTO 1120
1060 TOP=0
1070 FOR K=1 TO N
1080 IF I=K THEN GOTO 1100
1090 TOP=TOP+V(K)*G(I,K)+U(K)*B(I,K)
1100 NEXT K
1110 TUR(I,J+N-1)=2*V(I)*G(I,I)+TOP
1120 NEXT J
1130 NEXT I
1140 FOR I=2 TO N
1150 FOR J=2 TO N
1160 IF I<>J THEN GOTO 1180
1170 IF I=J THEN GOTO 1200
1180 TUR(I+N-1,J)=-U(I)*B(I,J)+V(I)*G(I,J)
1190 GOTO 1260
1200 TOP=0
1210 FOR K=1 TO N
1220 IF I=K THEN GOTO 1240
1230 TOP=TOP-U(K)*B(I,K)-V(K)*G(I,K)
1240 NEXT K
1250 TUR(I+N-1,J)=-2*U(I)*B(I,I)+TOP
1260 NEXT J
1270 NEXT I
1280 FOR I=2 TO N
1290 FOR J=2 TO N
1300 IF I<>J THEN GOTO 1320
1310 IF I=J THEN GOTO 1340
1320 TUR(I+N-1,J+N-1)=-V(I)*B(I,J)-U(I)*G(I,J)
1330 GOTO 1400
1340 TOP=0
1350 FOR K=1 TO N
1360 IF I=K THEN GOTO 1380
1370 TOP=TOP+U(K)*G(I,K)-V(K)*B(I,K)
1380 NEXT K
1390 TUR(I+N-1,J+N-1)=-2*V(I)*B(I,I)+TOP
1400 NEXT J
```

```
1410 NEXT I
1420 REM * J'nin TERSI *
1430 FOR K=2 TO Z
1440 FOR I=2 TO Z
1450 FOR J=2 TO Z
1460 IF I=K OR J=K THEN GOTO 1480
1470 TUR(I,J)=TUR(I,J)-TUR(I,K)*TUR(K,J)/TUR(K,K)
1480 NEXT J
1490 NEXT I
1500 TUR(K,K)=-1!/TUR(K,K)
1510 FOR I=2 TO Z
1520 IF I=K THEN GOTO 1540
1530 TUR(I,K)=TUR(I,K)*TUR(K,K)
1540 NEXT I
1550 FOR J=2 TO Z
1560 IF J=K THEN GOTO 1580
1570 TUR(K,J)=TUR(K,J)*TUR(K,K)
1580 NEXT J
1590 NEXT K
1600 FOR I=2 TO Z
1610 FOR J=2 TO Z
1620 TUR(I,J)=-TUR(I,J)
1630 NEXT J
1640 NEXT I
1650 FOR I=2 TO N
1660 DPQ(I)=DP(I)
1670 DPQ(I+N-1)=DQ(I)
1680 NEXT I
1690 FOR I=2 TO Z
1700 DU(I)=0
1710 FOR J=2 TO Z
1720 DU(I)=DU(I)+TUR(I,J)*DPQ(J)
1730 NEXT J
1740 NEXT I
1750 FOR I=2 TO N
1760 DUR(I)=DU(I)
1770 DV(I)=DU(I+N-1)
1780 NEXT I
1790 FOR I=2 TO N
1800 U(I)=U(I)+DUR(I)
1810 V(I)=V(I)+DV(I)
1820 NEXT I
1830 CLS
1840 KA=KA+1
1850 GOTO 610
1860 REM * YAKINSAMA *
1870 CLS
1880 PRINT TAB(25);KA;".ITERASYONDA YAKINSAMA OLDU"
1890 PRINT :PRINT
1900 PRINT TAB(23);"ELDE EDILEN BARA GERILIMLERI:"
1910 PRINT TAB(20);"-----"
```

```
1920 PRINT
1930 PRINT TAB(5);"REEL KISIM:";TAB(40);"IMAJINER KISIM:"
1940 FOR I=1 TO N
1950 PRINT "u(";I;")=";U(I);TAB(35);"v(";I;")=";V(I)
1960 NEXT I
1970 PRINT:PRINT
1980 PP(1)=0
1990 QP(1)=0
2000 FOR J=1 TO N
2010 PP(1)=PP(1)+U(1)*(U(J)*G(1,J)-V(J)*B(1,J))
      +V(1)*(V(J)*G(1,J)+U(J)*B(1,J))
2020 QP(1)=QP(1)+V(1)*(U(J)*G(1,J)-V(J)*B(1,J))
      -U(1)*(V(J)*G(1,J)+U(J)*B(1,J))
2030 NEXT J
2040 PRINT KA;".ITERASYON GUCLERI:"
2050 PRINT
2060 FOR I=1 TO N
2070 PRINT "PP(";I;")=";PP(I);TAB(35);"QP(";I;")=";QP(I)
2080 NEXT I
2090 PRINT:PRINT
2100 PRINT "GENERATOR IC GERILIM VE ACILARI"
2110 PRINT
2120 FOR I=1 TO N1
2130 R=(U^2-V^2-X1(I)*(V(I)*PP(I)-U(I)*QP(I)))/(U(I)^2+V(I)^2)
2140 S=(2*U(I)*V(I)+X1(I)*(U(I)*PP(I)+V(I)*QP(I)))/(U(I)^2+V(I)^2)
2150 E(I)=SQR(R^2+S^2)
2160 A(I)=ATN(S/R)
2170 PRINT "E(";I;")=";E(I);TAB(35);"A(";I;")=";A(I)
2180 U(I)=E(I):V(I)=A(I)
2190 NEXT I
2200 PRINT:PRINT
2210 FOR I=1 TO N
2220 FOR J=1 TO N
2230 G(I,J)=B(I,J)
2240 NEXT J
2250 NEXT I
2260 GOSUB 4700
2270 PRINT "GENERATOR MEKANIK GUCLERI"
2280 PRINT
2290 FOR I=1 TO N1
2300 PM(I)=0
2310 FOR J=1 TO N1
2320 PM(I)=PM(I)+B(I,J)*E(I)*E(J)*SIN(A(I)-A(J))
2330 NEXT J
2340 PRINT "PM(";I;")=";PM(I)
2350 NEXT I
2360 PRINT
2370 PRINT "                DEVAM ICIN BIR TUSA BASIN"
2380 CE$=INPUT $(1)
2390 CLS
2400 PRINT "ARIZA SONRASI B(I,J) MATRISINI GIRIN"
2410 FOR I=1 TO N
2420 FOR J=1 TO N
```

```
2430 LOCATE 3+J,1:PRINT "B(";I;",";J;")="
2440 LOCATE 3+J,12:INPUT G(I,J)
2450 NEXT J
2460 CLS
2470 NEXT I
2480 GOSUB 4700
2490 KA=0
2500 FOR I=1 TO N1
2510 F(I)=FM(I)
2520 G1(I)=0
2530 FOR J=1 TO N1
2540 F(I)=F(I)-B(I,J)*E(I)*E(J)*SIN(A(I)-A(J))
2550 G1(I)=G1(I)+B(I,J)*E(J)*COS(A(I)-A(J))
2560 NEXT J
2570 G1(I)=EF(I)-E(I)-(X(I)-X1(I))*G1(I)
2580 NEXT I
2590 MAKF=0
2600 FOR I=1 TO N1
2610 IF ABS(F(I))<=MAKF THEN GOTO 2630
2620 MAKF=ABS(F(I))
2630 NEXT I
2640 MAKG=0
2650 FOR I=1 TO N1
2660 IF ABS(G1(I))<=MAKG THEN GOTO 2680
2670 MAKG=ABS(G1(I))
2680 NEXT I
2690 IF MAKF<=EPS AND MAKG<=EPS THEN GOTO 3910
2700 REM *** JACOBIAN MATRIS HESABI ***
2710 FOR I=1 TO N1
2720 FOR J=1 TO N1
2730 IF I<>J THEN GOTO 2750
2740 IF I=J THEN GOTO 2770
2750 TUR(I,J)=B(I,J)*E(I)*E(J)*COS(A(I)-A(J))
2760 GOTO 2830
2770 TOP=0
2780 FOR K=1 TO N1
2790 IF I=K THEN GOTO 2810
2800 TOP=TOP-B(I,K)*E(I)*E(K)*COS(A(I)-A(K))
2810 NEXT K
2820 TUR(I,J)=TOP
2830 NEXT J
2840 NEXT I
2850 FOR I=1 TO N1
2860 FOR J=1 TO N1
2870 IF I<>J THEN GOTO 2890
2880 IF I=J THEN GOTO 2910
2890 TUR(I,J+N1)=-B(I,J)*E(I)*SIN(A(I)-A(J))
2900 GOTO 2970
2910 TOP=0
2920 FOR K=1 TO N1
2930 IF I=K THEN GOTO 2950
```

```
2940 TOP=TOP-B(I,K)*E(K)*SIN(A(I)-A(K))
2950 NEXT K
2960 TUR(I,J+N1)=TOP
2970 NEXT J
2980 NEXT I
2990 FOR I=1 TO N1
3000 FOR J=1 TO N1
3010 IF I<>J THEN GOTO 3030
3020 IF I=J THEN GOTO 3050
3030 TUR(I+N1,J)=-(X(I)-X1(I))*B(I,J)*E(J)*SIN(A(I)-A(J))
3040 GOTO 3110
3050 TOP=0
3060 FOR K=1 TO N1
3070 IF I=K THEN GOTO 3090
3080 TOP=TOP+B(I,K)*E(K)*SIN(A(I)-A(K))
3090 NEXT K
3100 TUR(I+N1,J)=(X(I)-X1(I))*TOP
3110 NEXT J
3120 NEXT I
3130 FOR I=1 TO N1
3140 FOR J=1 TO N1
3150 IF I<>J THEN GOTO 3170
3160 IF I=J THEN GOTO 3190
3170 TUR(I+N1,J+N1)=-(X(I)-X1(I))*B(I,J)*COS(A(I)-A(J))
3180 GOTO 3200
3190 TUR(I+N1,J+N1)=-1-(X(I)-X1(I))*B(I,I)
3200 NEXT J
3210 NEXT I
3220 REM * J'nin TERSEI *
3230 FOR I=1 TO Z1
3240 A1(I)=0:A2(I)=0
3250 A3(I)=0
3260 NEXT I
3270 FOR I=1 TO Z1
3280 P=0
3290 FOR J=1 TO Z1
3300 IF A3(J)=1 THEN GOTO 3370
3310 FOR K=1 TO Z1
3320 IF A3(K)=1 THEN GOTO 3360
3330 IF P>=ABS(TUR(J,K)) THEN GOTO 3360
3340 SA=J:KO=K
3350 P=ABS(TUR(J,K))
3360 NEXT K
3370 NEXT J
3380 A3(KO)=A3(KO)+1
3390 A1(I)=SA:A2(I)=KO
3400 IF SA=KO THEN GOTO 3460
3410 FOR J=1 TO Z1
3420 KG=TUR(SA,J)
3430 TUR(SA,J)=TUR(KO,J)
3440 TUR(KO,J)=KG
```

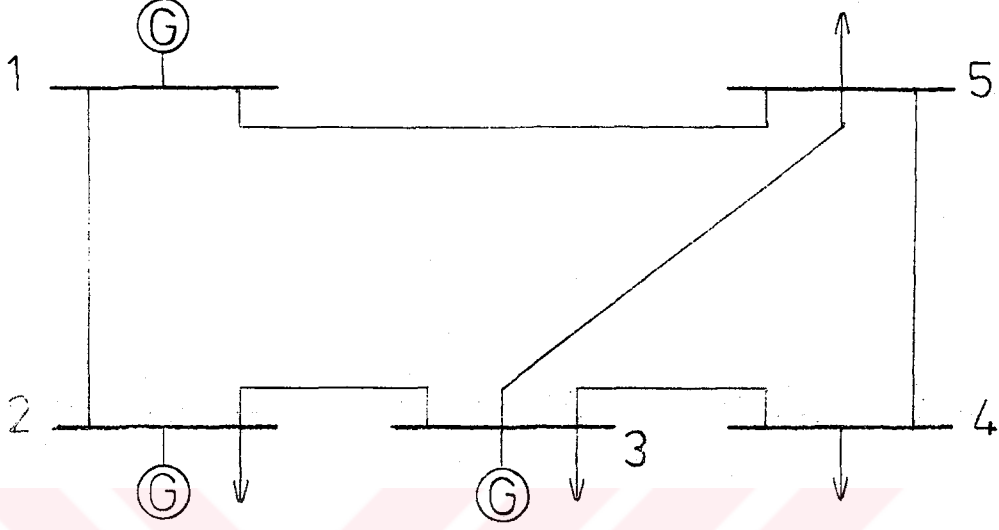
```
3450 NEXT J
3460 PIV=TUR(KO,KO)
3470 TUR(KO,KO)=1
3480 FOR J=1 TO Z1
3490 TUR(KO,J)=TUR(KO,J)/PIV
3500 NEXT J
3510 FOR J=1 TO Z1
3520 IF J=KO THEN GOTO 3580
3530 SI=TUR(J,KO)
3540 TUR(J,KO)=0
3550 FOR K=1 TO Z1
3560 TUR(J,K)=TUR(J,K)-TUR(KO,K)*SI
3570 NEXT K
3580 NEXT J
3590 NEXT I
3600 FOR I=1 TO Z1
3610 K=Z1+1-I
3620 IF A1(K)=A2(K) THEN GOTO 3690
3630 SA=A1(K):KO=A2(K)
3640 FOR J=1 TO Z1
3650 KD=TUR(J,SA)
3660 TUR(J,SA)=TUR(J,KO)
3670 TUR(J,KO)=KD
3680 NEXT J
3690 NEXT I
3700 FOR I=1 TO N1
3710 FG(I)=-F(I)
3720 FG(I+N1)=-G1(I)
3730 NEXT I
3740 FOR I=1 TO Z1
3750 DA(I)=0
3760 FOR J=1 TO Z1
3770 DA(I)=DA(I)+TUR(I,J)*FG(J)
3780 NEXT J
3790 NEXT I
3800 FOR I=1 TO N1
3810 DAR(I)=DA(I)
3820 DE(I)=DA(I+N1)
3830 NEXT I
3840 FOR I=1 TO N1
3850 A(I)=A(I)+DAR(I)
3860 E(I)=E(I)+DE(I)
3870 NEXT I
3880 KA=KA+1
3890 IF KA=5 THEN GOTO 3930
3900 GOTO 2500
3910 PRINT TAB(25);KA;".ITERASYONDA YAKINSAMA OLDU"
3920 PRINT:PRINT
3930 PRINT "ARIZA SONRASI DENGE NOKTALARI"
3940 PRINT
3950 FOR I=1 TO N1
```

```
3960 A(I)=ATN(TAN(A(I)))
3970 PRINT "E(";I;")=";E(I);TAB(35);"A(";I;")=";A(I)
3980 NEXT I
3990 PRINT :PRINT
4000 FOR I=1 TO N1
4010 FOR J=1 TO N1
4020 BA(I,J)=B(I,J)
4030 NEXT J:NEXT I
4040 INPUT "3-FAZLI ARIZA HANGI BARADA ?";Y
4050 FOR I=1 TO N
4060 G(Y,I)=0:G(I,Y)=0
4070 NEXT I
4080 GOSUB 4700
4090 FOR I=1 TO N1
4100 PP(I)=(1-(X(I)-X1(I))*BA(I,I))/TD(I)
4110 QP(I)=(X(I)-X1(I))/TD(I)
4120 NEXT I
4130 K=0
4140 FOR I=1 TO N1
4150 K=K+D(I)
4160 W(I)=314
4170 NEXT I
4180 K=-1/K
4190 T=0:DT=.01
4200 K1=0:K2=0
4210 FOR I=1 TO N1
4220 FOR J=1 TO N1
4230 K1=K1+D(I)*D(J)*(W(I)-W(J))^2
4240 K2=K2+BA(I,J)*(E(I)*E(J)*SIN(A(I)-A(J))
      -U(I)*U(J)*SIN(V(I)-V(J)))*(W(I)-W(J))
4250 NEXT J:NEXT I
4260 TVK=K*K1+K2
4270 IF TVK>0 THEN GOTO 4570
4280 FOR I=1 TO N1
4290 T1=0:T2=0
4300 FOR J=1 TO N1
4310 T1=T1+U(I)*U(J)*SIN(V(I)-V(J))
4320 T2=T2+B(I,J)*(E(J)*COS(A(I)-A(J))-U(J)*COS(V(I)-V(J)))
4330 NEXT J
4340 DW(I)=(PM(I)-D(I)*(W(I)-314)-T1)*DT/M(I)
4350 DU(I)=(-U(I)+E(I)-(X(I)-X1(I))*T2)*DT/TD(I)
4360 F(I)=W(I)
4370 G1(I)=U(I)
4380 H(I)=V(I)
4390 W(I)=W(I)+DW(I)
4400 U(I)=U(I)+DU(I)
4410 V(I)=V(I)+.5*(F(I)+W(I)-628)*DT
4420 NEXT I
4430 FOR I=1 TO N1
4440 T1=0:T2=0
4450 FOR J=1 TO N1
4460 T1=T1+U(I)*U(J)*SIN(V(I)-V(J))
```

```
4470 T2=T2+B(I,J)*(E(J)*COS(A(I)-A(J))-U(J)*COS(V(I)-V(J)))
4480 NEXT J
4490 DWR(I)=(PM(I)-D(I)*(W(I)-314)-T1)*DT/M(I)
4500 DUR(I)=(-U(I)+E(I)-(X(I)-X1(I))*T2)*DT/TD(I)
4510 W(I)=F(I)+.5*(DW(I)+DWR(I))
4520 U(I)=G1(I)+.5*(DU(I)+DUR(I))
4530 V(I)=H(I)+.5*(F(I)+W(I)-628)*DT
4540 NEXT I
4550 T=T+DT
4560 GOTO 4200
4570 CLS
4580 VC=0
4590 FOR I=1 TO N1
4600 FOR J=1 TO N1
4610 VC=VC+BA(I,J)*(U(I)*U(J)*(COS(A(I)-A(J))-COS(V(I)-V(J)))
      -(V(I)-V(J)-A(I)+A(J))*E(I)*E(J)*SIN(A(I)-A(J)))
4620 NEXT J:NEXT I
4630 PRINT "LIAPUNOV FONKSIYONUNUN KRITIK DEGERI"
4640 PRINT :PRINT
4650 PRINT "Vcr=";VC
4660 PRINT :PRINT
4670 PRINT "KRITIK ARIZA TEMIZLEME ZAMANI"
4680 PRINT "tcr=";T
4690 END
4700 FOR I=1 TO N1
4710 FOR J=1 TO N1
4720 C1(I,J)=G(I,J)
4730 NEXT J:NEXT I
4740 FOR I=1 TO N1
4750 FOR J=1 TO Z2
4760 C2(I,J)=G(I,J+N1)
4770 NEXT J:NEXT I
4780 FOR I=1 TO Z2
4790 FOR J=1 TO N1
4800 C3(I,J)=G(I+N1,J)
4810 NEXT J:NEXT I
4820 FOR I=1 TO Z2
4830 FOR J=1 TO Z2
4840 C4(I,J)=G(I+N1,J+N1)
4850 NEXT J:NEXT I
4860 FOR I=1 TO Z2
4870 A1(I)=0:A2(I)=0
4880 A3(I)=0
4890 NEXT I
4900 FOR I=1 TO Z2
4910 P=0
4920 FOR J=1 TO Z2
4930 IF A3(J)=1 THEN GOTO 5000
4940 FOR K=1 TO Z2
4950 IF A3(K)=1 THEN GOTO 4990
4960 IF P>=ABS(C4(J,K)) THEN GOTO 4990
4970 SA=J:KO=K
```

```
4980 F=ABS(C4(J,K))
4990 NEXT K
5000 NEXT J
5010 A3(K0)=A3(K0)+1
5020 A1(I)=SA:A2(I)=K0
5030 IF SA=K0 THEN GOTO 5090
5040 FOR J=1 TO Z2
5050 K6=C4(SA,J)
5060 C4(SA,J)=C4(K0,J)
5070 C4(K0,J)=K6
5080 NEXT J
5090 PIV=C4(K0,K0)
5100 C4(K0,K0)=1
5110 FOR J=1 TO Z2
5120 C4(K0,J)=C4(K0,J)/PIV
5130 NEXT J
5140 FOR J=1 TO Z2
5150 IF J=K0 THEN GOTO 5210
5160 SI=C4(J,K0)
5170 C4(J,K0)=0
5180 FOR K=1 TO Z2
5190 C4(J,K)=C4(J,K)-C4(K0,K)*SI
5200 NEXT K
5210 NEXT J
5220 NEXT I
5230 FOR I=1 TO Z2
5240 K=Z2+1-I
5250 IF A1(K)=A2(K) THEN GOTO 5320
5260 SA=A1(K):K0=A2(K)
5270 FOR J=1 TO Z2
5280 KD=C4(J,SA)
5290 C4(J,SA)=C4(J,K0)
5300 C4(J,K0)=KD
5310 NEXT J
5320 NEXT I
5330 FOR I=1 TO N1
5340 FOR J=1 TO Z2
5350 FOR K=1 TO Z2
5360 CD(I,J)=CD(I,J)+C2(I,K)*C4(K,J)
5370 NEXT K
5380 NEXT J
5390 NEXT I
5400 FOR I=1 TO N1
5410 FOR K=1 TO N1
5420 FOR J=1 TO Z2
5430 C(I,K)=C(I,K)+CD(I,J)*C3(J,K)
5440 NEXT J
5450 NEXT K
5460 NEXT I
5470 FOR I=1 TO N1
5480 FOR J=1 TO N1
5490 B(I,J)=C1(I,J)-C(I,J)
5500 NEXT J:NEXT I
5510 RETURN
```

Örnek:



Şekil 1. Bir güç sistemi

Şekil 1'deki güç sisteminin arıza öncesi güç durumu Tablo 1'de, generatör parametreleri Tablo 2'de ve bara admitans matrisi Tablo 3'de gösterilmiştir.

3-5 hattında 3 nolu baraya yakın 3-fazlı bir kısa-devre olduğunda, arıza sırası admitans matrisi Tablo 4'de ve arıza sonrası admitans matrisi de Tablo 5'de (iletkenlikler ihmal edildiğinden sadece B değerleri) verilmiştir. Temel güç 100 MVA ve temel gerilim 16,5 kV dur.

Tablo 1. Güç durumu

Bara no	Üretim		Tüketim	
	MW	MVAR	MW	MVAR
1(ref.)	0	0	0	0
2	50	25	15	10
3	0	0	45	20
4	0	0	40	15
5	0	0	50	25

Tablo 2. Generatör parametreleri

	1	2	3
x_d	0,146	0,8958	1,3125
x_d'	0,0608	0,1198	0,1813
$T_{do}'(s)$	8,96	6	5,89
M	0,0608	0,0212	0,0149
D	4,08	1,42	1
E_{fd}	0,031	0,013	0,013

Tablo 3. Bara admitans matrisi

	1	2	3	4	5
1	$11,72-j24,27$	$-10+j20$	0	0	$-1,72+j4,31$
2	$-10+j20$	$10,96-j24,77$	$-0,96+j4,81$	0	0
3	0	$-0,96+j4,81$	$6,78-j21,95$	$-5+j15$	$-0,82+j2,2$
4	0	0	$-5+j15$	$15-j34,98$	$-10+j20$
5	$-1,72+j4,31$	0	$-0,82+j2,2$	$-10+j20$	$12,54-j26,45$

Tablo 4. Arıza sırası admitans matrisi (B)

	1	2	3	4	5
1	$-24,27$	20	0	0	4,31
2	20	$-24,77$	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	$-34,98$	20
5	4,31	0	0	20	26,45

Tablo 5. Arıza sonrası admitans matrisi (B)

	1	2	3	4	5
1	- 24,27	20	0	0	4,31
2	20	-24,77	4,81	0	0
3	0	4,81	-19,78	15	0
4	0	0	15	-34,98	20
5	4,31	0	0	20	-24,28

Bu durumda kritik arıza temizleme süresi aşağıdaki biçimde hesaplanmıştır.



ELDE EDILEN BARA GERILIMLERİ:

REEL KISIM:

u(1)= 1
u(2)= .9846085
u(3)= .8736955
u(4)= .8602487
u(5)= .8674157

İMAJİNER KISIM:

v(1)= 0
v(2)=-8.165825E-03
v(3)=-.1255425
v(4)=-.1336036
v(5)=-.1251186

2 .İTERASYON GUCLERİ:

PP(1)= 1.084539
PP(2)= .3499699
PP(3)=-.44902
PP(4)=-.3988691
PP(5)=-.4988895

QP(1)= .5424085
QP(2)= .1499701
QP(3)=-.197029
QP(4)=-.1469278
QP(5)=-.2464638

GENERATOR İC GERİLİM VE ACILARI

E(1)= .0737269
E(2)= 3.183902E-02
E(3)= .3709355

A(1)= 1.107046
A(2)= .9469495
A(3)= 1.426944

GENERATOR MEKANİK GUCLERI

PM(1)= 1.910993E-02
PM(2)= 3.371622E-02
PM(3)= 5.282615E-02

ARIZA SONRASI DENGİ NOKTALARI

E(1)= .647433	A(1)= .5036876
E(2)= .4677612	A(2)= .5036876
E(3)= .4050411	A(3)= .5036876

LIAPUNOV FONKSIYONUNUN KRİTİK DEGERİ

Vcr= .1683843

KRİTİK ARIZA TEMİZLEME SURESI

tcr= .14

ÖZGEÇMİŞ

Cengiz BEKTAŞ, 11 Haziran 1966 tarihinde İstanbul' da doğdu. Heybeliada Hüseyin Rahmi Gürpınar Lisesi'ni 1983 yılında bitirdi. Aynı yıl İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği bölümüne girdi. Bu bölümü 1987-88 öğrenim yılı yaz döneminde bitirdi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine, 1988-89 öğrenim yılında başladı.

