

ENERJİ FONKSİYONU ANALİZİ İLE GERİLİM KARARLILIĞI İNCELEMESİ

Ahmet ÇİFCİ¹ Ahmet Turan HOCAOĞLU² Yılmaz UYAROĞLU³
Mehmet Ali YALÇIN⁴

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü^{1,3,4}
Sakarya Üniversitesi, Esentepe Kampüsü, Sakarya

Elektroteknik Laboratuvarı Müdürlüğü²
TSE Kalite Kampüsü, Gebze, Kocaeli

¹e-posta y075008015@sakarya.edu.tr
³e-posta uyaroglu@sakarya.edu.tr

²e-posta elektrotekniklab@tse.org.tr
⁴e-posta yalcin@sakarya.edu.tr

ÖZET

Güç sistem kararlılığı genellikle bir güç sisteminin, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bir bozucu etki sonrası tekrar normal denge durumuna dönebilmesidir. Gerilim kararlılığı ve gerilim çökmesi olayı, dünyanın çeşitli yerlerinde meydana gelen enerji sistem çökmeleri nedeniyle, güç sistem analizi ve kontrolünde çok önemli bir konu olmaya başlamıştır. Bu çalışmada Lyapunov'un ikinci metodu basit bir elektrik güç sistemine uygulanarak, sistemin enerji fonksiyonu oluşturulmuş ve böylece sistemdeki enerji seviye değişikliklerinin sistemin kararlılığına etkisi MATHCAD programı kullanılarak gösterilmiştir.

Anahtar sözcükler: Gerilim kararlılığı, Enerji fonksiyonu, Lyapunov'un ikinci metodu, Değişken gradient metot

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın artması ile birlikte ekonomik ve çevresel etkiler güç sistemlerini kararlılık limitine yakın noktalarda çalışmaya zorladığından kararlılık sınırları azalmaya ve gerilim kararlılığı önemli bir konu olmaya başlamıştır. Gerilim kararlılığı kavramı bir enerji sisteminin yük baralarının gerilimlerinin genliklerini, gerek sürekli hal gerilim kararlılığı gerekse geçici hal gerilim kararlılığı olaylarında belirli işletme sınırları içinde tutabilme yeteneği olarak ifade edilir [1].

Gerilim kararlılığı problemi güç sisteminde aşırı yüklenme, arızalanma veya yetersiz reaktif güç durumlarında oluşur. Son yıllarda, gerilim kararlılığı problemi çoğu enerji sistem ağının çökmesine sebep olmuştur. Bu olumsuzluklar gerilim kararlılığı konusundaki çalışmaların artmasını beraberinde getirmiştir. Bunlardan bazı örnekler; 1990 Mısır sistem arızası [2], 1997 Şili sistem arızası [3], 2003 Amerika-Kanada sistem arızası [4,5], 2005 Avustralya ve Rusya sistem arızaları, 2006 Yeni Zelanda sistem arızaları olarak gösterilebilir.

Generatör, hat, transformatör, bara v.b. elemanların herhangi bir sebeple devre dışı edilmesiyle, gerilim kontrolünün yapılamaması veya yükün artması durumlarında, kontrolsüz gerilim düşümü olursa güç sisteminin kararsızlığı söz konusu olur. Gerilim kararsızlığının esas nedeni, aşırı yüklü sistemlerde gerilim değerlerini belirli bir değerde tutabilmek için sistemin ihtiyaç duyduğu reaktif enerjiyi sistemin karşılayamamasıdır [6-9]. Gerilim kararsızlığının nasıl meydana geldiği, kararsızlığa götüren nedenin ne olduğu, hangi bölgelerin gerilim açısından zayıf olduğu ve gerilim kararsızlığının geliştirilmesine en etkili kısıtların neler olduğu ortaya konmalıdır [10].

Klasik anlamda kararlılık çalışmaları aktif güç-yük açısı (P- δ) arasındaki ilişkiye odaklanırken, gerilim kararlılığı çalışmalarında reaktif güç-gerilim genliği (Q-V) ilişkisi ön plana çıkmaktadır. Gerilim kararlılığı çalışmalarının klasik yolu, sürekli hal gerilim kararlılığına yani statik yük akışı analizlerine dayanmaktadır. Ancak statik yük akışı analizleri gerilim kararlılığının dinamik davranışı hakkında yeterli bilgi veremeyeceğinden, dinamik yük akışı analizlerinin de göz önüne alınması gerekmektedir [11].

Bu çalışmada Lyapunov'un ikinci metodu tek makine sonsuz bara sistemine uygulanarak, sistemin enerji fonksiyonu oluşturulmuş ve böylece sistemdeki enerji seviye değişikliklerinin sistemin kararlılığına etkisi incelenmiştir.

2. LYAPUNOV KARARLILIK ANALİZİ

Doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin kararlılığının incelenmesinde değişmez üstellerin kullanılabileceğini ilk olarak 1889 yılında Rus matematikçi Sonya Kovalevskaya göstermiştir. Kovalevskaya'nın çalışması daha sonra 1892 yılında diğer bir Rus matematikçi olan Alexandr Mikhailovich Lyapunov tarafından geliştirilmiştir.

Lyapunov'un ikinci metodu, dinamik sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü bulmadan sistemin kararlılığını inceleme olanağı verir. İkinci metot, kesin

çözümleri bulunmayan doğrusal olmayan sistemlerin kararlılık analizi için uygundur. Bu metot zamana bağlı doğrusal olmayan sistemlerin kararlılık durumlarının tespitinde en genel metottur ve bilinen tüm sistemlere uygulanabilir.

2.1. Doğrusal olmayan sistemlerin kararlılık analizi

Doğrusal olmayan sistemlerin kararlılığı bölgeseldir. Bu yüzden genellikle orijin civarında en geniş bölgede yeterli kararlılık şartlarını sağlayan Lyapunov fonksiyonu aranır.

Lyapunov'un ikinci metodundan ortaya çıkan birkaç metot, doğrusal olmayan sistemlerin kararlılığının testi için uygundur. Bunlardan biri, Lyapunov fonksiyonların genellenmesi için kullanılan değişken gradiyent metodudur.

2.1.1. Değişken gradiyent metot

Eğer verilen bir sistem için kararlılığın doğruluğunu gösterebilen özel bir Lyapunov fonksiyon bulunabiliyorsa bu V fonksiyonunun bir gradiyenti de vardır [12].

Bir sistem aşağıdaki biçimde tanımlı olarak verilsin:

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (2.1)$$

Uzayın orijininde olan bir denge noktası var olduğu kabul edilsin. V ile bir test Lyapunov fonksiyonu gösterilsin. Bu fonksiyonda V, x'in açık fonksiyonu fakat t'nin açık fonksiyonu olmadığı varsayılsın. Öyleyse;

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial V}{\partial x_2} \dot{x}_2 + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} \dot{x}_n \quad (2.2)$$

yazılabilir. Buradan da şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{V} = (\nabla V)^* \dot{x} \quad (2.3)$$

Burada $(\nabla V)^*$, ∇V 'nin transpozudur. V'nin gradiyenti ∇V şöyle olur:

$$\nabla V = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial V}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla V_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \nabla V_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

V, ∇V 'nin çizgisel integrali şeklinde ifade edilebilir:

$$V = \int_0^x (\nabla V)^* dx \quad (2.5)$$

Burada integralin üst limiti V'nin bir vektör büyüklüğü olduğunu göstermez, fakat integral uzayda rastgele bir noktanın (x_1, x_2, \dots, x_n) çizgisel integraline tercih edilir. Bu integral integrasyon metodundan bağımsız yapılabilir.

2.1.2. Gradyent sistemi kullanarak Lyapunov fonksiyonun araştırılması

Bir dinamik sistemin en basit formunda kolayca oluşturulan Lyapunov fonksiyon gradiyent sistemdir[12]. Bu formun bir sistemi aşağıdaki biçimde tanımlı olarak verilsin:

$$\dot{x} = -A \nabla v(x, x_0) \quad (2.6)$$

Burada; $v, \mathcal{R}^n \times \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ devamlı olarak diferansiyellenebilir. $A \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $\det(A) \neq 0$ ve $v(x, x_0) = 0$, $x = x_0$ olarak tanımlıdır. Eğer x_0 'da $v(x, x_0)$ 'ın hessian'ı tamamen pozitif belirli ise x_0 'da denge noktası asimptotik kararlıdır.

Lyapunov fonksiyon aşağıdaki denklem ile verilir:

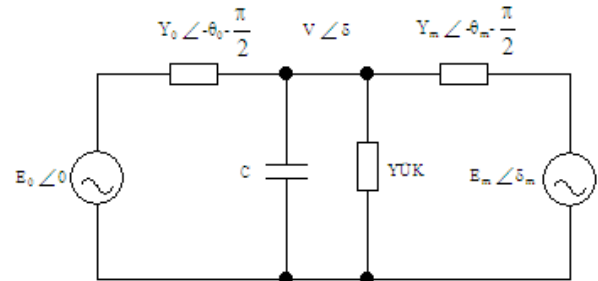
$$V(x) = \int_{x_0}^x [f(\xi)]^T d\xi \quad (2.7)$$

Yukarıda verilen Lyapunov fonksiyon denklemi tek makine sonsuz bara sisteminde enerji fonksiyonunun bulunması için kullanılacaktır.

3. TEK MAKİNE SONSUZ BARA SİSTEMİ İÇİN ENERJİ FONKSİYONU ANALİZİ

Gerilim çökmesi olayının anlaşılması için Dobson ve Chiang [13] bir güç sistem modeli tanıtmışlardır. Gerilim çökme çalışmaları için bir işletme yükünü ifade eden asenkron motora paralel sabit P-Q yükü ve sabit empedans yükünden oluşan yük modelini önermektedirler.

Şekil 3.1'de örnek bir güç sistemi gösterilmiştir:



Şekil 3.1. Güç sisteminin basit bir örneği

Bu sistem bir adet sonsuz güçlü bir bara, bir generatör ve bir yük barasından oluşmaktadır. Yük asenkron motora paralel sabit P-Q yükü ve sabit empedans yükünden oluşmaktadır. Yük barası, sabit empedansının bir parçası olarak gerilim genliğini belli değerlerde tutmak için kapasite içermektedir.

Şekil 3.1’de verilen güç sistem modelinin durum denklemlerini gösteren 4 adet 1. dereceden diferansiyel denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir [13].

$$\dot{\delta}_m = w \quad (3.1)$$

$$M\dot{w} = -Dw + P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) \dots + E_m^2 Y_m \sin \theta_m \quad (3.2)$$

$$K_{qw} \dot{\delta} = -K_{qv} V - K_{qv2} V^2 + Q - Q_0 - Q_1 \quad (3.3)$$

$$TK_{qw} K_{pv} \dot{V} = K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V \dots + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q) - K_{qw} (P_0 + P_1 - P) \quad (3.4)$$

Generatör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir ($P_M = P_L$) koşulu altında yukarıdaki denklemler tekrar yazılabilir:

$$\dot{w} = -\frac{D}{M^2} Mw - \frac{1}{M} f(\delta, \delta_m, V) \quad (3.5)$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{1}{M} Mw \quad (3.6)$$

$$\dot{\delta} = -g(\delta, \delta_m, V) \quad (3.7)$$

$$\dot{V} = -h(\delta, \delta_m, V) \quad (3.8)$$

Burada $f(\delta, \delta_m, V)$, $g(\delta, \delta_m, V)$ ve $h(\delta, \delta_m, V)$ aşağıdaki şekildedir:

$$f(\delta, \delta_m, V) = -(P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) \dots + E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)) \quad (3.9)$$

$$g(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{K_{qw}} (-K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + Q - Q_0 - Q_1) \quad (3.10)$$

$$h(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{TK_{qw} K_{pv}} (K_{pw} K_{qv2} V^2 \dots + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q) \dots - K_{qw} (P_0 + P_1 - P)) \quad (3.11)$$

(3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) ile verilen diferansiyel denklemler, yüksek gerilim çalışma noktasında oldukça karmaşık yük modellemesini içeren basit sistem modelinin tanımınıdır.

3.1. Basit bir güç sistemi için Lyapunov fonksiyon formuna gradyent sistemin tanımlanması

Şekil 3.1’de görülen sistem için Lyapunov fonksiyonun elde edilmesinde (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8) denklemleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_m \\ \dot{w} \\ \dot{\delta} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{D}{M^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(\delta_m, \delta, V) \\ Mw \\ g(\delta_m, \delta, V) \\ h(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

(3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) denklemleriyle tanımlanan sistem için (3.12) denklemi bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

$(w_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)$ ’ın bir denge noktası için, (3.12) denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyonu ((3.12) denkleminin sağ tarafında görülen (4x1) gradyent matris) elde edilebilir ve böylece (2.7) denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu (2.7) denkleminde şöyle yazılabilir:

$$v(w, \delta_m, \delta, V) = \int_{(w_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)}^{(w, \delta_m, \delta, V)} \begin{bmatrix} Mw \\ f(\delta_m, \delta, V) \\ g(\delta_m, \delta, V) \\ h(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} dw \\ d\delta_m \\ d\delta \\ dV \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$f(w, \delta_m, \delta, V)$, $g(w, \delta_m, \delta, V)$ ve $h(w, \delta_m, \delta, V)$ (3.13) denkleminde yerine konulursa, güç sisteminin enerji fonksiyonu elde edilir.

$(w^*, \delta_m^*, \delta^*, V^*) = (0.0, 0.3, 0.2, 0.97)$ denge noktası olarak seçilmiştir.

Tek makine sonsuz bara için enerji fonksiyonu analizi, generatör açısı ve yük durum değişkenlerine dayanan iki analiz içerecektir. Bu iki analizin asıl amacı, güç sisteminin tüm enerjisi üzerinde yükün ne çeşit etkilere sahip olabileceğinin araştırılmasıdır.

3.1.1. Generatör rotor açısı $\delta_m = 0.8$ rad ve sistem frekansı $w = 1$ pu

Aşağıda verilen enerji fonksiyonu tek makine sonsuz bara için örnek alınan enerji fonksiyondur.

$$v(\delta, V) = 2.008V^3 + a_2 V^2 + a_1 V + a \quad (3.14)$$

Yukarıda verilen örnek enerji fonksiyonu, $f(w, \delta_m, \delta, V)$, $g(w, \delta_m, \delta, V)$ ve $h(w, \delta_m, \delta, V)$ (3.13) denkleminde yerine konulmasıyla bulunan enerji fonksiyonuna eşitlendiğinde a_2 , a_1 ve a sırasıyla aşağıdaki şekilde bulunur:

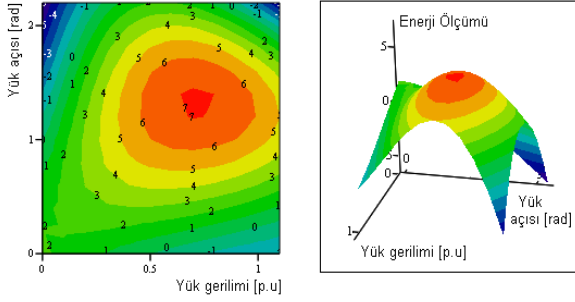
$$a_2 = 2.426 - 14.907\delta + 0.075\sin(\delta - 0.887) + 0.3\sin(\delta - 0.209) \dots - \cos(\delta - 0.887) - 4\cos(\delta - 0.209) \quad (3.15)$$

$$a_1 = 3.329 + 2.8\delta + 5\cos(-\delta + 0.213) - 5\cos(-\delta + 0.713) \dots + 5\sin(\delta - 0.887) + 20\sin(\delta - 0.209) \quad (3.16)$$

$$a = -1.788 - 1.3\delta - 0.063\sin(\delta - 0.887) - 0.254\sin(\delta - 0.209) \dots + 0.846\cos(\delta - 0.887) + 3.386\cos(\delta - 0.209) \quad (3.17)$$

Yukarıdaki sonuçların MATHCAD programında grafiksel gösterilimi eş yükselti eğrileri ve üç boyutlu

olarak şekil 3.2a ve 3.2b'de gösterilmektedir. İki boyutlu eş yükselti eğrileri grafiği farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu göstermektedir. Her eş yükselti eğrisinin tablo 3.1'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır. Şekillerdeki kırmızı bölgeler enerji yoğunluğunu göstermektedir. Şekil 3.2a aynı enerji seviyesinde sistemin alçak gerilim ve yüksek gerilimde çalışabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.2. $\delta_m=0.8\text{rad}$ ve $w=1\text{pu}$ durumunda sistemin depolanmış enerjisinin gösterilimi

- İki boyutlu olarak gösterilim
- Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 3.2a'da enerji yoğunluğunun $0.5 \leq V \leq 1$ ve $1 \leq \delta \leq 1.6$ arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji kuvvetinin 6 ve 7.5 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Tablo 3.1. $\delta_m=0.8\text{ rad}$ ve $w=1\text{ pu}$ durumu için enerji ölçümü

δ	Enerji Ölçümü										
0	2,1	1,7	1,3	0,9	0,4	0,0	-0,3	-0,8	-1,1	-1,5	-1,7
0.2	2,0	2,1	2,0	1,9	1,7	1,5	1,2	0,8	0,4	0,1	-0,2
0.4	1,7	2,2	2,6	2,8	2,9	2,9	2,7	2,5	2,2	1,8	1,3
0.6	1,2	2,2	3,0	3,6	3,9	4,1	4,2	4,1	3,8	3,4	2,9
0.8	0,6	2,1	3,2	4,1	4,8	5,2	5,4	5,4	5,2	4,9	4,3
1	-0,0	1,7	3,2	4,4	5,3	5,9	6,3	6,4	6,3	5,9	5,4
1.2	-0,9	1,2	3,0	4,4	5,5	6,3	6,8	7,0	6,9	6,5	5,9
1.4	-1,8	0,5	2,5	4,2	5,4	6,3	6,9	7,1	6,9	6,5	5,7
1.6	-2,9	-0,2	1,9	3,6	5,0	5,9	6,4	6,6	6,4	5,8	4,9
1.8	-3,9	-1,2	1,0	2,8	4,1	5,0	5,5	5,5	5,1	4,3	3,2
V	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Tablo 3.1, generatör rotor açısı $\delta_m=0.8\text{ rad}$ ve sistem frekansı $w=1\text{ pu}$ olmak üzere, farklı yük açıları (δ) ve yük gerilimleri (V) için enerji fonksiyonunun sayısal değerlerini göstermektedir. Çalışma noktasına bağlı olarak, sistemin tüm depolanan enerjisinin sistem yükünün zamanla değişmesi ile alçalması veya yükselmesi görülmektedir. Bu depolanmış enerji seviyesinin alçalması ve yükselmesi, alçak yük gerilimi ve yüksek yük gerilimi çalışmalarına karşılık gelmektedir. Böylece, sistem tarafından tolere edilemeyecek yük değişimleri arasındaki sınır kolayca belirlenebilir. $\delta_m=0.8\text{ rad}$ 'ın seçimi ile oluşan bu yeni denklik noktası sistemin kararsız olmasına sebep olmadan daha büyük gerilim değişimleri olabileceğini göstermektedir.

3.1.2. Generatör rotor açısı $\delta_m=1.6\text{ rad}$ ve sistem frekansı $w=1\text{ pu}$

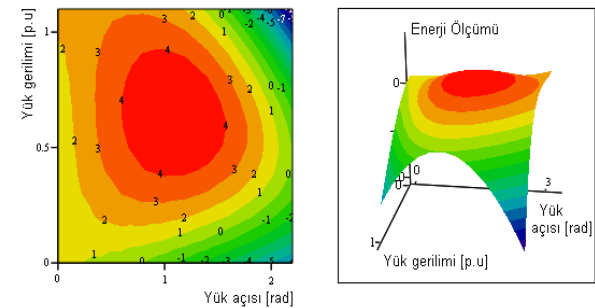
Yüke bağlı olan durum değişkenleri ve güç üretim seviyesi aşağıdaki değişimler ile generatör açısı (δ_m) 0.8 radyandan 1.6 radyana yükseltilerek, çalışma noktası yeni bir seviyeye kaydırılmış olur. (3.14)'de verilen enerji fonksiyonu, ilk analizde olduğu gibi bu analiz için de örnek alınan enerji fonksiyondur. (3.14)'de verilen örnek enerji fonksiyonu $f(w, \delta_m, \delta, V)$, $g(w, \delta_m, \delta, V)$ ve $h(w, \delta_m, \delta, V)$ (3.13) denkleminde yerine konulmasıyla bulunan enerji fonksiyonuna eşitlendiğinde a_2 , a_1 ve a sırasıyla aşağıdaki şekilde bulunur:

$$a_2 = 2.425 - 14.907\delta + 0.075 \sin(\delta - 1.687) + 0.3 \sin(\delta - 0.209) \dots - \cos(\delta - 1.687) - 4 \cos(\delta - 0.209) \quad (3.18)$$

$$a_1 = 5.140 + 2.8\delta + 5 \cos(-\delta + 0.213) - 5 \cos(-\delta + 1.513) \dots + 5 \sin(\delta - 1.687) + 20 \sin(\delta - 0.209) \quad (3.19)$$

$$a = -2.241 - 1.3\delta - 0.063 \sin(\delta - 1.687) - 0.254 \sin(\delta - 0.209) \dots + 0.846 \cos(\delta - 1.687) + 3.386 \cos(\delta - 0.209) \quad (3.20)$$

Yukarıdaki sonuçların MATHCAD programında grafiksel gösterilimi eş yükselti eğrileri ve üç boyutlu olarak şekil 3.3a ve 3.3b'de gösterilmektedir. İki boyutlu eş yükselti eğrileri grafiği farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu göstermektedir. Her eş yükselti eğrisinin tablo 3.2'den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır. Şekillerdeki kırmızı bölgeler enerji yoğunluğunu göstermektedir.



Şekil 3.3. $\delta_m=1.6\text{rad}$ ve $w=1\text{pu}$ durumunda sistemin depolanmış enerjisinin gösterilimi

- İki boyutlu olarak gösterilim
- Üç boyutlu olarak gösterilim

Şekil 3.3a'da enerji yoğunluğunun $0.4 < V \leq 0.9$ ve $0.6 \leq \delta \leq 1.4$ arasında olduğu görülmektedir. Bu noktalar etrafında enerji kuvvetinin 4 ve 5 arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

Güç üretim seviyesi $\delta_m=0.8$ radyandan $\delta_m=1.6$ radyana değiştirildiğinde sistemin çalışma noktası da kaydırılır. Tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir. İlk analizde $\delta=1.4\text{ rad}$ ve $V=0.7\text{ pu}$ iken maksimum okunan enerji 7.1'dir (Bkz. Tablo 3.1). Ancak bu analizde δ ve V'nin aynı

değerlerinde maksimum enerji seviyesi 4.5'tir (Bkz. Tablo 3.2).

Tablo 3.2. $\delta_m=1.6$ rad ve $w=1$ pu durumu için enerji ölçümü

δ					Enerji Ölçümü						
0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	2,0
0,2	1,0	1,4	1,7	1,9	2,0	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4
0,4	0,8	1,5	2,1	2,5	2,8	3,0	3,2	3,2	3,1	3,0	2,8
0,6	0,4	1,5	2,3	3,0	3,5	3,8	3,9	4,0	3,8	3,6	3,2
0,8	-0,02	1,3	2,4	3,3	3,9	4,3	4,5	4,5	4,4	4,0	3,5
1	-0,6	1,0	2,3	3,4	4,1	4,6	4,9	4,9	4,6	4,1	3,4
1,2	-1,3	0,5	2,0	3,2	4,1	4,7	4,9	4,9	4,5	3,9	3,0
1,4	-2,2	-0,1	1,6	2,9	3,8	4,4	4,6	4,5	4,0	3,2	2,1
1,6	-3,1	-0,8	0,9	2,3	3,2	3,8	3,9	3,6	3,0	2,0	0,7
1,8	-4,0	-1,7	0,1	1,4	2,3	2,8	2,8	2,4	1,5	0,3	-1,3
V	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Çalışma noktasının bu yeni seviyesinde açıkça görülmektedir ki yükteki herhangi bir değişim depolanan enerji seviyesini aşağılara düşürmeye ve hatta belki de negatif değerlere kadar düşürmeye devam edecektir. Yükteki bir değişimin depolanan enerjide bir artışa sebep olduğu durumda, sistem kararsızlık noktasından uzaklaşma eğilimi göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Yapılan enerji fonksiyonu analizi ile depolanan enerji ölçümünün, çalışma noktasının kararsızlık bölgesine yakınlığını gösterdiği sonucuna varılır. Yani enerji seviyesi çalışma noktasının kararsızlığa yakınlığının ölçüsüdür. Bu çalışma, farklı seviyelerdeki sistem çalışmasının gösterimi ve yük gerilimlerine karşılık gelen depolanmış enerji seviyelerinde elde edilen kritik yük açıları ile tek makine sonsuz bara sisteminin kararlılık tavrını açıkça gösterebilecek daha gerçekçi bir enerji fonksiyonu elde edilebileceğini göstermektedir. Böylece bu da sistemdeki enerji dalgalanmalarının, sistemin kararlılığı üzerindeki etkisini çok iyi bir şekilde gösterebilmektedir. Sonuç olarak, yük açısı ve yük geriliminin en uygun aralığı, yük açıları ve yük gerilimlerine bağlı sistem için kararlılık aralığını grafiklendiren bu enerji dalgalanmalarıyla belirlenebilir.

EK

Yük parametreleri [13]:

$$K_{pw} = 0.4, K_{pv} = 0.3, K_{qw} = -0.03, K_{qv} = -2.8, K_{qv2} = 2.1, T = 8.5, P_0 = 0.6, Q_0 = 1.3, P_1 = 0.0, Q_1 = 0.0$$

Şebeke ve generatör parametreleri [13]:

$$Y_0 = 20, \theta_0 = -5, E_0 = 1, C = 12, Y_0' = 8, \theta_0' = -12, E_0' = 2.5, Y_m = 5, \theta_m = -5, E_m = 1, P_m = 1, D = 0.05, M = 0.3$$

Açılar derece, diğer değerler per-unit cinsindedir.

KAYNAKLAR

[1] TAYLOR, C. W., Power system voltage stability. Mc Graw – Hill Inc, New York, 1994; pp. 17–40.

[2] EL-SADEK, M.Z., Preventive measures for voltage collapses and voltage failures in the Egyptian power system. Electric Power Systems Research 1998; 44:203–211.

[3] VARGAS L. S., CAÑIZARES C. A., Time dependence of controls to avoid voltage collapse. IEEE Trans. Power Systems. July 2000; paper no. PE-006PRS.

[4] Interim Report: Causes of the august 14th blackout in The United States and Canada, Tech. Rep., November 2003.

[5] US-Canada Power Systems Outage Task Force, First Report on The August 14 2003, Blackout in The United States and Canada: Causes and Recommendations, April 2004.

[6] VAN CUTSEM, T., VOURNAS C., Voltage stability of electric power systems. Norwell, MA:Kluwer, 1998.

[7] IEEE Working Group on Voltage Stability, Voltage Stability of Power System: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience, IEEE Special Publication 90TH0358-PWR, 1990.

[8] VAN CUTSEM, T., Voltage Instability: Phenomenon, Countermeasures and Analysis Methods. Proc. IEEE, vol. 88, 2000, pp. 208-227.

[9] HILL, D. J., Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies. IEEE Trans. Power Systems, vol. 8, February, 1993, pp. 166-176.

[10] AYGEN, Z. E., Elektrik enerji sistemlerinde genetik algoritma kullanarak optimizasyona yeni bir yaklaşım. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.

[11] YALÇIN, M. A., Enerji sistemlerinde gerilim kararlılığının yeni bir yaklaşımla incelenmesi. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1995.

[12] SLOTINE, J. J. E., LI, W., Applied nonlinear control, Prentice-Hall, Inc., 1991, pp. 57-97.

[13] CHIANG, H. D., DOBSON, I., THOMAS, R. J., THORP, J. S., FEKIH-AHMED, L., On voltage collapse in Electric Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, No. 2, May 1990, pp. 601–611.