

# GÜÇ SİSTEMLERİNDE COĞRAFI OLARAK DAĞILMIŞ BÖLGELER ARASI SALINIMLI KARARSIZLIKLAR

İstemihan GENÇ

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Elektrik-Elektronik Fakültesi  
İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak, İstanbul

e-posta: [genc@elk.itu.edu.tr](mailto:genc@elk.itu.edu.tr)

*Anahtar sözcükler: Enterkonnekte Güç Sistemleri, Elektromekanik Salınımlar, Kümeleme Yöntemleri, Hopf Çatallanması*

## ÖZET

*Bu bildiride, elektrik güç sistemlerinde coğrafi olarak dağılmış bölgeler arası salınımlı kararsızlıklar (oscillatory instability), Hopf çatallanması (Hopf bifurcation) ile bağlantılı olarak incelenmiştir. Sistemde meydana gelen bu tür kararsızlıkların incelenmesi için, özdeğer duyarlılık analizine ve eşvrelilik (coherency) kavramlarına dayandırılan bir kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Elektromekanik salınım modlarının tümünü kullanan bu yöntem ile sistemde coğrafi olarak dağılmış birbirlerine göre eşvrelilik olarak salınan bölgeler ve bunlara karşılık gelen salınım modları belirlenmiştir. Güç sistemlerinde oluşabilecek salınımlı kararlılık veya kararsızlık koşulları sistemin seçilen bir çalışma noktasına ait tanımlanmış fizibilite bölgesi (feasibility region) ve sınırlarının hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Coğrafi olarak dağılmış bölgeler arası salınım modlarına ait Hopf çatallanma noktalarının, fizibilite sınırının parçalarını oluşturması durumu, bu modların rol oynadıkları salınımlı kararsızlık koşulları ve şekilleri tartışılmıştır.*

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi iletim sistemlerinin yapısının değişkenliği ve bu sistemlerde iletilen güç değerleri, günümüzde verimin ve kazancın yükseltilmesi gibi nedenlerden dolayı artmaktadır. Bu koşullar, sistemin birçok çalışma noktasında ve özellikle işletme sınırlarına yakın noktalarda çalıştırılmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, sistemin salınımlı kararsızlığa geçebileceği koşulların belirlenmesi, çalışma noktalarının ve kontrol yöntemlerin buna göre seçilmesi oldukça önemlidir.

Bu bildiride, elektrik güç sistemlerinde oluşabilecek salınımların incelenmesi ve bu salınımların oluşmasında rol oynayan bölgelerin belirlenmesi için bir kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Tüm elektromekanik modları göz önüne alan bu yöntem ile, coğrafi olarak ayrılmış veya dağılmış bölgeler, ve bu bölgelerin aralarındaki salınım modları belirlenir.

Bildiride örnek olarak seçilen 68 baralı bir güç sistemi için söz konusu kümeleme yöntemi uygulanmış ve coğrafi olarak dağılmış bölgeler arası meydana gelebilecek salınım modları belirlenmiştir. Ayrıca, seçilen bir parametre alt-uzayı içinde fizibilite bölgesi [1,2] ve salınımlı kararsızlıkların oluşabileceği koşulları belirleyen bir fizibilite sınırı [1,2] hesaplanmıştır.

Çeşitli elektromekanik modların Hopf çatallanması [3] noktaları olarak karşımıza çıkan fizibilite sınırının tamamı veya bir parçası, coğrafi olarak dağılmış bölgeler arası rol oynayan modlara karşılık gelen çatallanma noktaları tarafından oluşabilir. Bildiride, örnek sistem üzerinde bu koşullar ve oluşan bu salınımların karakteristiği tartışılmıştır.

## 2. EŞVRELİ SALINIMLAR

Elektrik güç iletim sistemlerinde yarı-durağan (quasi-stationary) dinamik, diferansiyel-cebirselsel denklemlerle ifade edilebilir [4]:

$$\begin{aligned} \Sigma: \dot{x} &= f(x, y, p) & f: \mathcal{R}^{n+m+p} &\rightarrow \mathcal{R}^n, \\ 0 &= g(x, y, p) & g: \mathcal{R}^{n+m+p} &\rightarrow \mathcal{R}^m, \end{aligned} \quad (1)$$

$$x \in X \subseteq \mathcal{R}^n, \quad y \in Y \subseteq \mathcal{R}^m, \quad p \in P \subseteq \mathcal{R}^p.$$

Bu denklem sisteminin  $X \times Y$  durum uzayında, dinamik ve ani durum değişkenleri birbirinden ayrılmış, ve sırasıyla  $x$  ve  $y$  ile gösterilmiştir. Parametre uzayı  $P$ 'de sisteme ait parametre vektörü,  $p$  ile gösterilmektedir. Tekil olmayan çalışma noktalarında tanımlanabilen indirgenmiş Jacobiyen matrisi,

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial y} \left( \frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x}. \quad (2)$$

Seçilen bir çalışma noktası etrafında  $\Sigma$  sisteminin (1) doğrusallaştırılmış modelinin modları, sistemin zorlanmamış cevabını aşağıdaki gibi belirler:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n v_i w_i' e^{\lambda_i t} x(0). \quad (3)$$

Burada,  $v_i$  ve  $w_i$  sırasıyla,  $A$  indirgenmiş Jacobiyen matrisinin  $\lambda_i$  özdeğerine karşılık gelen sağ ve sol özvektörleridir. Bu özvektörler, sistemde oluşan salınım modlarının nasıl uyarılabildiği ve nasıl gözlenildiği hakkındaki bilgileri içerir [5].

**Tanım:**  $\dot{x} = Ax$  şeklinde ifade edilen bir doğrusal sistem ele alalım.  $A$  matrisinin özdeğerlerinin bir kümesi  $\sigma$  ile gösterilsin. Eğer  $\sigma$ 'nın özdeğerlerine karşılık gelen modların hiçbiri  $x_i - x_j$ 'den gözlenemiyorsa, durum değişkenleri  $x_i$  ve  $x_j$   $\sigma$ -eşvreliidir [6].

Yukarıdaki tanıma göre, aktif güç-açı dinamiğini içeren bir güç sistemi modeline ait seçilen uygun durum değişkenlerine karşılık gelen sağ özvektör değerleri ile, generatör ve tüm baraların eşvreliliği tanımlanabilir ve bu eşvreliliğe yakınlık çeşitli yöntemlerle belirlenebilir [7]. Diferansiyel-cebirsal sistemdeki (1) ani durum değişkenlerinin eşvreliliği, yukarıda hesaplanan indirgenmiş doğrusal sisteme ait dinamik durum değişkenlerine karşılık gelen özvektörlerden aşağıdaki gibi türetilir:

$$v^y = - \left( \frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} v^x \quad (4)$$

Burada,  $v^x$  ve  $v^y$  sırasıyla, dinamik ve ani durum değişkenlerine karşılık gelen özvektörlerdir.

### 3. KÜMELEME YÖNTEMLERİ

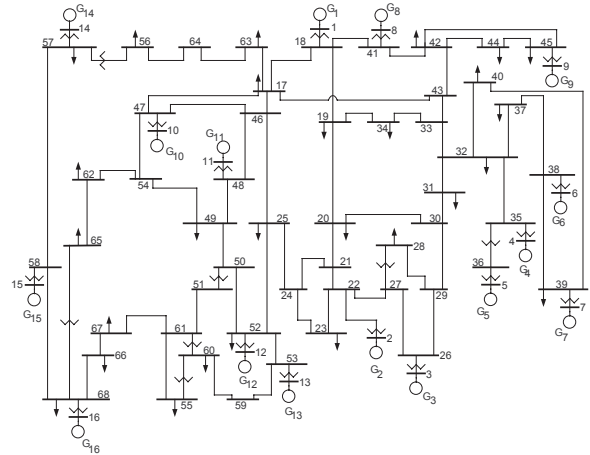
Enerji iletim sistemlerinin analizinde, diğer büyük sistemlerde olduğu gibi, sistemin daha küçük parçalara ayrılarak incelenmesi, hesaplamaların daha kolay ve hızlı yapılabilmesi gibi birçok nedenden dolayı tercih edilen bir yöntemdir.

Güç sistemlerine uygulanan birçok kümeleme yöntemi, sistemin çalışma noktasının belirlediği özdeğerlerin duyarlılık analizine veya durum değişkenlerinin eşvreliliği kavramlarına dayandırılmaktadır [6,8-11]. Kullanılan bu yöntemler sistemi zayıf bağlı bölgelere ayırmakta ve genellikle bu bölgeler coğrafi olarak birbirinden ayrılmış olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu yöntemler aracılığıyla yapılan sistem dinamiği incelemeleri, sistemde coğrafi olarak dağılmış olan bölgelerin arasındaki dinamiği göz ardı etmektedir. Özellikle, sistemin kararlı çalışma koşullarının belirlenmesi araştırma konusu olduğunda, sisteme ait bu tür dinamiği içeren bir kümeleme yönteminin kullanılması büyük önem arz etmektedir.

Bu bildiriye, diğer yöntemlerden farklı olarak, sistemin tüm salınım modlarını göz önüne alan ve özdeğer-özvektör duyarlılığı ve eşvrelilik kavramlarına dayandırılan bir kümeleme yöntemi [7] kullanılmıştır. Ayrıca, bu yöntem ile sadece generatör grupları değil, aynı zamanda tüm baralar ve iletim hatları kümelenebilmektedir. Bu yöntemde, sistemin aktif güç-açı dinamiği ile doğrudan ilişkili olan her bir  $\lambda$  elektromekanik salınım modu için, bu moda göre salınım yapan ve baskın rol oynayan  $\lambda$ -eşvreli bara grupları belirlenir. Aynı şekilde, iletim hatları da grup içi ve gruplar arası bağlantılar olmak üzere sınıflandırılır ve böylelikle, birbirlerine göre salınan  $M_\lambda$  ve  $N_\lambda$  bölgeleri belirlenmiş olur [7]. Bununla birlikte, bu yöntem ile sistemin çalışma koşullarına bağlı olan ve genellikle sistemin coğrafyası ile bağıntılı olan bölgeler belirlenebilir. Bu bölgeler içi ve bölgeler arası salınım modları ayrı edilebilir [7].

### 4. BİR ÖRNEK SİSTEM ÜZERİNDE UYGULAMA

Bu bölümde, bildiriye bahsedilen kümeleme yöntemi, örnek olarak seçtiğimiz 16 generatörlü 68 baralı sistem [12] üzerine uygulanmıştır (Şekil-1). Hesaplanabilen fizibilite bölge ve sınırlarının yardımıyla, coğrafi olarak dağılmış bölgeler arası salınımlı kararsızlıkların ortaya çıkabileceği üzerinde tartışılmıştır.



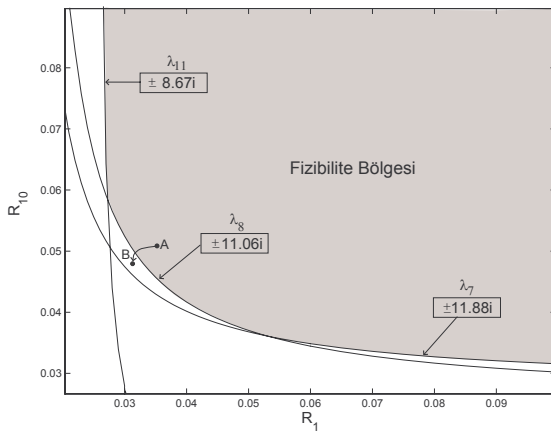
Şekil-1. 16 generatörlü 68 baralı örnek sistem

Aktif güç-açı dinamiğini içeren örnek sistemin modeli, seçilen bir çalışma noktasında, Tablo-1'de listelenmiş olan elektromekanik salınım modlarını içermektedir. Tabloda, ayrıca, her bir moda karşılık gelen birbirlerine karşı salınan  $\lambda$ -eşvreli baskın generatör grupları,  $M_\lambda^g$  ve  $N_\lambda^g$  kümeleri ile belirtilmiştir. Buna göre, 7, 8 ve 10 numaralı modlar coğrafi olarak dağılmış olan generatör grupları arası salınım modlarıdır. Buna karşılık diğer modlar, sistemin birbirlerinden coğrafi olarak ayrılmış sistem parçaları arasında gözlenebilen modlardır.

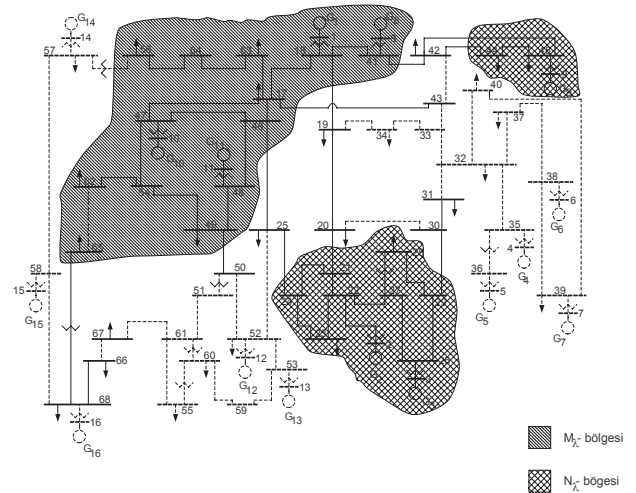
Tablo-1. Elektromekanik salınım modları ve  $\lambda$ -eşvreli generatör grupları

No.	Mod	$M_{\lambda}^g$	$N_{\lambda}^g$
1	$\pm 17.763i$	{5}	{4}
2	$\pm 16.318i$	{7}	{6}
3	$\pm 15.447i$	{1}	{8}
4	$\pm 15.339i$	{11}	{10,12}
5	$\pm 14.456i$	{3}	{2}
6	$\pm 13.860i$	{10,13}	{11,12}
7	$\pm 11.882i$	{1,8}	{9,10,11}
8	$\pm 11.056i$	{1,8,10,11}	{2,3,9}
9	$\pm 10.682i$	{4,5}	{6,7}
10	$\pm 9.807i$	{4,5,6,7,9}	{1,2,3,10,11}
11	$\pm 8.659i$	{1,8,9}	{4,5,6,7}
12	$\pm 6.007i$	{12,13,15}	{14,16}
13	$\pm 5.082i$	{12,13,14}	{1,2,3,4,5,6,7,8,9,15}
14	$\pm 4.321i$	{15,16}	{1,2,3,4,5,6,7,8,9,14}
15	$\pm 2.785i$	{14,15}	{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13}

Sistemin kararlılığı analizi için ikinci bir adım olarak, seçilen bir parametre alt-uzayında fizibilite bölgesi ve sınırı belirlenmiştir. Örnek olarak, Şekil-2'de fizibilite bölgesi ve sınırı  $R_1 \times R_{10}$  parametre alt-uzayında verilmiştir. Burada,  $R_i$ ,  $i$  generatörüne ait hız regülatörü sabitini temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, fizibilite sınırını, 7, 8 ve 11 numaralı modlara ( $\lambda_7, \lambda_8, \lambda_{11}$ ) karşılık gelen Hopf çatallanma noktaları oluşturmaktadır.

Şekil-2.  $R_1 \times R_{10}$  parametre alt-uzayında fizibilite bölgesi ve sınırı

Örnek olarak, sistemin çalışma noktasının, fizibilite bölgesine ait yerel kararlı bir A noktasından yerel kararsız olan bir B noktasına doğru yer değiştirdiğini düşünelim. Bu durumda, geçilen fizibilite sınırı noktası, 8 numaralı salınım moduna ( $\lambda_8$ ) karşılık gelen bir Hopf çatallanma noktasıdır. Hopf çatallanması sonucu sistemin çalışma noktasının etrafında kararlı veya kararsız limit çevrimler (limit cycles) oluşur [3]. Eğer Hopf çatallanmasının tipi süperkritik (supercritical) ise, bu çevrimler kararlıdır. Bir bozucu sonrasında, eğer sistem çevrimin çekim alanından ayrılmadıysa, sistemin çözümü kararlı bir limit çevrimine yakınsar [3]. Bir başka deyişle, diğer tüm salınım modları sönümlenirken, sistemde sadece 8 numaralı salınım modu sürekli olarak ve sönümlenmeyen bir şekilde gözlenir. Bununla birlikte, bu salınım moduna göre eşvreli olan sistem parçaları arası salınımlar sönümlenmeyen bir şekilde sürecektir. Uyguladığımız kümeleme yöntemi ile belirlenen  $\lambda_8$  salınım modu için,  $M_{\lambda}$  ve  $N_{\lambda}$  bölgeleri Şekil-3'de gösterilmiştir. Bu bölgeler birbirlerine göre salınım yapan coğrafi olarak dağılmış  $\lambda_8$ -eşvreli generatör ve baraları içeren sistem parçalarıdır. Ayrıca, bölge içi ve bölgeler arası iletim hatları ayırt edilmiş ve bu salınım modunda rol oynamayan bağlantılar, baralar ve generatörler noktalı çizgilerle gösterilmiştir. Eğer çatallanmanın tipi subkritik (subcritical) ise çalışma noktası etrafındaki limit çevrimler kararsızdır [3]. Bu koşullarda, sistem normal çalışma noktasından uzaklaşacak ve kararsızlığa doğru sürüklenecektir.

Şekil-3.  $\lambda_8$ -moduna göre coğrafi olarak dağılmış  $M_{\lambda}$  ve  $N_{\lambda}$  bölgeleri

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, enterkonnekte güç sistemlerinde oluşabilecek coğrafi olarak dağılmış bölgeler arası salınımlı kararsız çalışma durumu incelenmiştir. Elektrik güç sistemlerinin değişen çalışma noktalarında kararlı çalışmasını sürdürebilmesi için

sistemde meydana gelebilecek her elektromekanik salınım modunun kararsızlık koşullarına yakınlığı önceden bilinmeli ve izlenmelidir. Bunun için sistemin çalışma noktalarına ait fizibilite bölgelerinin ve sınırlarının hesaplanması önemli bir çalışma alanını oluşturmaktadır. Bütün bu işlemlerin doğru ve anlamlı bir şekilde yürütülebilmesi amacıyla, sistemin kararlılığı analizi için uygun bir kümeleme yönteminin kullanılması gereklidir. Bildiride, coğrafi olarak dağılmış olan bölgeler arasında salınımlı kararsızlıkların gözlenebileceği, bir örnek sistem üzerinde uygulanan kümeleme ve fizibilite sınırı kavramlarıyla gösterilmiştir. Sistemin kararlı çalışmasını sağlamak için bu gibi durumların ve koşulların incelenmesi büyük önem arz etmektedir.

### KAYNAKLAR

- [1] Venkatasubramanian V., Schättler H., Zaborszky J., Dynamics of Large Constrained Nonlinear Systems – A Taxonomy Theory, Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 8, pp. 1530-1561, 1995.
- [2] Venkatasubramanian V., Schättler H., Zaborszky J., Local Bifurcations and Feasibility Regions in Differential-algebraic systems, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 40, No. 12, pp. 1992-2013, 1995.
- [3] Guckenheimer J., Holmes P., Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of vector fields, Springer-Verlag, 1983.
- [4] Ilić M., Zaborszky J., Dynamics and Control of Large Electric Power Systems, John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [5] Kundur P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [6] Kokotovic P. V., Avramovic B., Chow J. H., Winkelman J. R. , Coherency based decomposition and aggregation, Automatica, Vol. 18, No.1 , pp. 47-56, 1982.
- [7] Genç V. M. İ., Hopf Bifurcation Related Coherent Oscillations in Electric Power Systems with a Clustered Texture, Dissertation, Washington University, 2001.
- [8] Pérez-Arriaga I. J., Verghese G. C., Schweppe F. C., Selective modal analysis with applications to electric power systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9, pp. 3117-3125, 1982.
- [9] Yusof S. B., Rogers G. J., Alden R. T. H., Slow coherency based network partitioning including load buses, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1375-1382, 1993.
- [10] Chow J. H., Galarza R., Accari, Price W. W., Inertial and slow coherency aggregation algorithms for power system dynamic model reduction, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 1986-1993, 1995.
- [11] Nath R., Lamba S. S., Rao K. S., Coherency based system decomposition into study and external areas using weak coupling, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 6, pp. 1443-1449, 1985.
- [12] Rogers G., Power System Structure and Oscillations, IEEE Computer Applications in Power, pp. 14-21, 1999.