

DYNAMIC FUZZY NETWORKS BASED LOAD FREQUENCY CONTROLLER DESIGN IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Yusuf OYSAL*

Anadolu University, Department of Computer Engineering, Eskişehir, Türkiye
e-mail: yoysal@anadolu.edu.tr

Ahmet Serdar YILMAZ

K.Maras Sutcu Imam University, Dept. of Electrical and Electronics Engineering,
Kahramanmaraş, Türkiye. e-mail: asyilmaz@ksu.edu.tr

Etem KÖKLÜKAYA

Sakarya University, Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Adapazarı, Türkiye
e-mail: ekaya@sakarya.edu.tr

ABSTRACT

In this paper, a new controller based on intelligent control technologies for load frequency control (LFC) is proposed. This controller overcome some drawbacks of neural network and fuzzy logic technologies and may also allow for the incorporation of both heuristics and deep knowledge to exploit the best characteristics of each. A “Dynamical Fuzzy Network (DFN)” that contains dynamical elements such as delayers or integrators in their processing units is used in the controller design for LFC. This design is based on adjusting parameters of DFN. This is done by minimizing the cost functional of load frequency errors. The cost gradients with respect to the network parameters are calculated by adjoint sensitivity analysis.

Key words : Load frequency control, dynamic fuzzy network, power system control, intelligent control.

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE DİNAMİK BULANIK AĞ TABANLI BİR YÜK FREKANS DENETLEYİCİ TASARIMI

ÖZET

Bu makalede, akıllı denetim esasına dayanan bir yük frekans denetleyicisi önerilmiştir. Önerilen yeni kontrolör sinir ağları ve bulanık mantık teknolojilerinin sakıncalı taraflarının üstesinden gelmekte ve her birinin üstün taraflarını kullanmaktadır. Kendi işlem birimlerinde geciktiriciler ve integratörler gibi dinamik elemanları içeren bir dinamik bulanık ağı (DBA), bir yük frekans denetimi tasarımında kullanılmıştır. Tasarım, DBA parametrelerinin hesaplanmasına dayanır. Bu da yük frekans hata masraflarını içeren bir ölçütün en aza indirilmesi ile sağlanır. Gerekli olan ölçütün ağı parametrelerine göre gradyanları, adjoint duyarlılık analizi ile hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler:Yük frekans denetimi, dinamik bulanık ağı, güç sistemlerinin denetimi, akıllı denetim.

1. GİRİŞ

Elektrik güç sistemlerinde kararlı ve güvenilir çalışma için frekans önemli bir kriterdir. Enterkonnekte güç sistemlerinde frekansta meydana gelen değişimler büyük ölçekli ciddi kararsızlık problemlerine yol açabilmektedir. Yük frekans kontrolü, birden çok bölgeden oluşan büyük güç sistemlerinde kararlı ve güvenilir bir işletme için sağlanması gereken denetim şekillerinden biridir. İyi bir işletme için frekansın sabit tutulması ve aktif güç

1. INTRODUCTION

Frequency is an important criteria for reliable and stable operation in electric power systems. Frequency variations in interconnected power systems can cause large scale serious instability problems. Load frequency control is one of control schemes to provide the stable and reliable operation in multi-area power systems. For stable operation, constant frequency and active power balance must be provided. Frequency is depending on active

dengesinin oluşturulması gerekmektedir. Frekans ile aktif güç arasında birebir bir ilişki vardır. Frekans kontrolü için aktif güç kontrolü zorunluluktur. Frekans, enterkonnekte sistemde her nokta için ortak bir karakteristik olduğundan aktif güç üretimi yada tüketiminde meydana gelen bir değişme, sistemin her noktasında frekansta salınımlar ya da düşmeler oluşmasına yol açmaktadır.

Literatürde yük frekans kontrolü gerçekleştirmek amacıyla bulanık mantık ve yapay sinir ağlarını kullanan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Kazancın ayarlanabildiği PI denetleyiciler (1), genetik algoritmalar (2), iki seviyeli bulanık denetleyiciler (3), lineer olmayan sinirsel ağlar (4) ve bulanık PID denetleyiciler (5) yük frekans kontrolü için uygulanmış yöntemlerdir. Bu bildiride önerilen yeni denetim şekli yapay sinir ağları ve bulanık mantıkla denetimin sakıncalı ve istenmeyen yanlarını gidererek, bu iki bilgiye dayalı teknolojinin en iyi taraflarını birleştirmektedir. Bu çalışmada, yük frekans denetleyici tasarımı içerisinde, içerisindeki işlem biriminde erteleyici ve dinamik elemanlar bulunduran ve aktivasyon fonksiyonu seviyesinde standart bulanık sistem olan bir dinamik bulanık sinir ağı (DBA) kullanılmıştır (6,7).

2. İKİ BÖLGEDEDEN OLUŞAN GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS DENETİMİ

İki yada daha fazla güç bölgesi içeren enterkonnekte güç sistemlerinde, bölgeler arasındaki güç akışını istenen sınırlar içerisinde tutmak için üretim denetimi gerekmektedir. Yük frekans denetimi iki ana denetim çevriminden oluşmaktadır. Bunlar birincil ve ikincil denetim çevrimleridir (8).

Birincil denetim türbin ve hız regülatörlerince gerçekleştirilmektedir. Bu çevrimle frekans her zaman anma değerinde tutulamamakta ve kalıcı frekans hatasını giderememektedir. Bu yüzden çok bölgeli sistemlerde, yeterli bir denetim sağlayamamaktadır. Çünkü çok bölgeli sistemlerde bir bölgedeki frekans değişimi diğer bölgeye de etki etmektedir. İkincil denetim çevrimi yada bir başka deyişle ilave denetim çevrimi ile söz konusu kalıcı frekans hatası giderilmektedir. Bunu ise bölgeler arasındaki güç akışına yön vererek yapmaktadır. Bağlantı hatlarındaki aktif güç akışı denetlenebilmektedir. Günümüzde bilgisayar destekli denetleyiciler bu işlemi gerçekleştirebilmektedir. Şekil 1'de iki bölgeden oluşan bir güç sisteminde birincil ve ikincil yük frekans denetimi gösterilmektedir.

Bu çalışmada incelenen bölgeler arasındaki bağlantı hattı üzerinden bir akış meydana gelmektedir. Bu güç akışının denetimi ve dengesi ikincil frekans denetimi ile mümkündür. Ayrıca frekans ve aktif güç üretiminin denetimi için, bağlantı hattındaki güç salınımlarının sönümlenmesi bir başka gereksinimdir. Bu makalede gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri için şekil 2'deki matematiksel model kullanılmıştır. Bu klasik model, bir integral denetleyici içermektedir ve parametreleri ekte verilmiştir.

power. To improve the stability of the power networks, it is necessary to design a load frequency control (LFC) systems that control the power generation and active power at tie lines. Any change in active power demand/generation at power systems is reflected throughout the system by a change in frequency.

There are many studies that used fuzzy logic and artificial neural networks for load frequency control in the literature. Gain scheduled PI controllers (1), genetic algorithms (2), two level fuzzy controllers (3), nonlinear neural nets (4) and fuzzy PID controllers (5) have been used for load frequency control. This paper proposed to design a controller that overcomes some of the drawback of artificial neural networks and fuzzy logic control and combines the successful properties of both control actions. In this study, a dynamic fuzzy network (DFN) that includes dynamic elements with delay operators in its processing unit and has a standart fuzzy activation function is used (6,7).

2. LOAD FREQUENCY CONTROL IN TWO AREA POWER SYSTEMS

In interconnected power networks with two or more areas, the generation within each area has to be controlled so as to maintain scheduled power interchange. Load frequency control scheme have to be two main control loops. These are primary control and secondary control. (8).

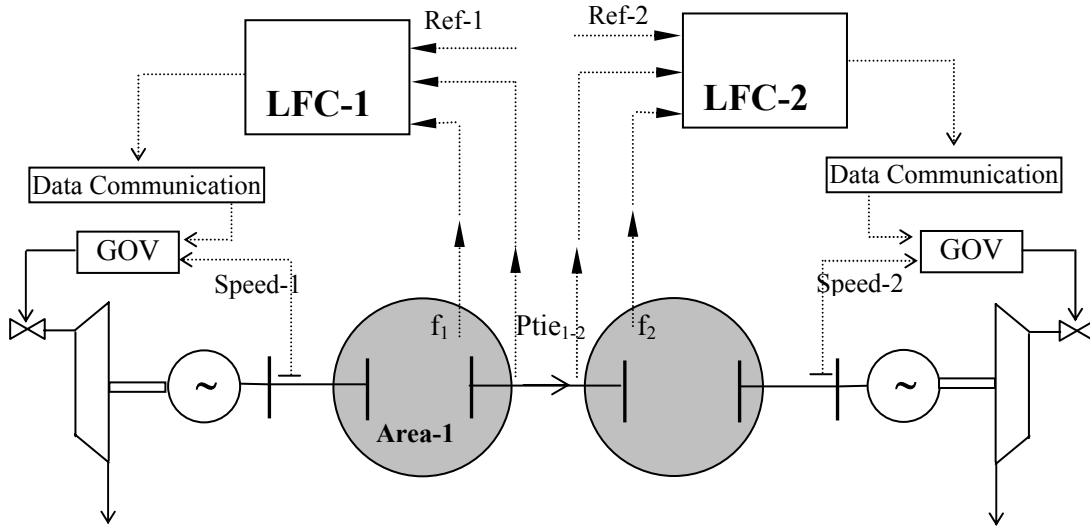
Primary control is achieved by turbine-governing system. Maintaining the frequency at scheduled value cannot be succeeded. A steady state frequency error can occur forever. So this loop does not enough for multi-area power systems. In multi-area power systems, frequency must be equal and must be hold a rated value at all areas. The second control loop is called supplementary control. This is realized in large power systems that includes two or more areas. Active power is controlled at the tie line between neighbor areas. Nowadays computer-aided controllers realize this action. Fig. 1 shows primary and secondary control loops.

In studied systems, there is a load flow between areas through a tie line. Balance and control of power flow is realized by secondary control loop. Also damping of oscillations at tie line is another requirement for successful control of frequency and active power generation. In this paper, linearized mathematical model given in fig. 2 is used in computer simulations. This model includes classical integral secondary controller and its parameters are given in appendix.

In secondary frequency control loop, the controlling of the power flow through the tie line is important. The purpose of tie line is: (i) to provide the power interchange with reasonable cost between the areas and (ii) to meet the generation demand which will decrease the frequency

İkincil frekans denetim çevriminde önemli olan bağlantı hattındaki güç akışının denetimidir. Bağlantı hatlarının amacı bölgeler arasında uygun maliyetli güç alış verişini sağlamak ve iki bölgeden birinde meydana gelen ani bir yük değişiminde yaşanacak olan frekans değişimlerini azaltacak üretim talebini hızlı bir şekilde karşılamaktır.

variations during the suddenly load change in one of the two areas, quickly.



GOV : Speed Governor , LFC : Load frequency controller

Figure 1 Load frequency control scheme in a two area interconnected system
Şekil 1 İki bölgele enterkonnekte sistemde yük frekans denetimi

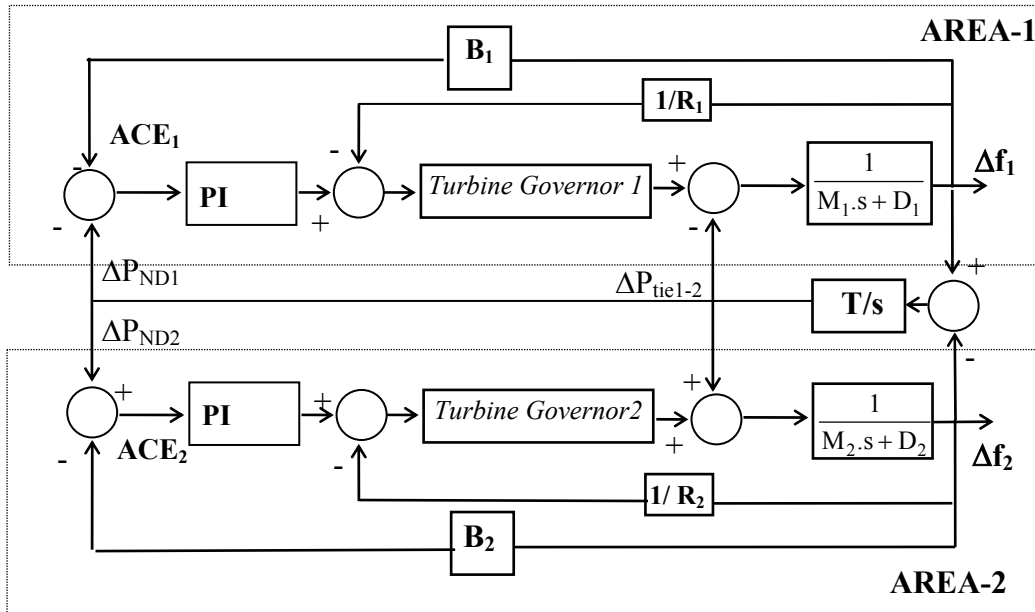


Figure 2. Block diagram of a two-area system with classical PI controller
Şekil.2. İki bölgele klasik PI denetleyicili sistemin blok diyagramı

Örnek olarak bu makalede ele alınan iki bölgele sistemi basitçe şekil.3' de olduğu gibi düşünülürse, bu sistemin

For example, as in this paper, for the sample power system shown in fig.3, if it is assumed that the generation

üretim yük karakteristikleri birbirine eşit olduğu varsayılırsa, ve birinci bölgeden diğerine 100MW'lık güç alışverişinin normal koşullarda söz konusu olduğu kabul edilirse, ikinci bölgede 30 MW'lık yük artışı olduğunda, bu iki özdeş bölge, 15'er MW şeklinde yeni yükü paylaşacaktır. Böylece bağlantı hattından ikinci bölgeye 115 MW yük akışı olacaktır. Böyle bir değişim çeşitli sebeplerden dolayı uygulanamayınca birinci alan 30 MW'nın tamamını karşılamak için üretimini arttırmak zorunda kalacaktır. Bu da ekstra maliyeti gerektirmektedir. Bu aşamada arzu edilen, ikinci bölgedeki ani talebi algılayacak ve frekansı nominal değerine geri getirecek, bunu yaparken de ikinci bölgede 30 MW'lık üretim artışını gerçekleştirecek bir denetim mekanizmasıdır (9).

and load characteristics are equal and area 1 sends 100 MW to area 2, when a sudden load increase of 30 MW in area 2, both identical areas share this increase equally. Therefore area 1 must send 115 MW to area 2 throughout the tie line. But this change cannot be applied, so area 1 must increase its generation to meet all of 30 MW. This requires extra generation cost. In this level, a control action which senses the sudden demand in area 2 and returns the frequency to rated value and also realizes the generation increase of 30 MW in area 2, is desired. (9)

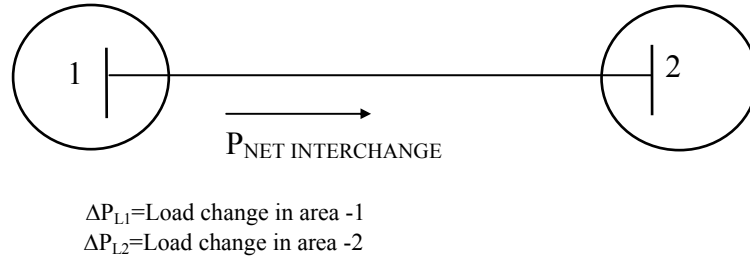


Figure 3. Tie line frequency control for two-area power system
Şekil 3. İki bölge için bağlantı hattı frekans denetimi

Bu denetim mekanizması şu maddeleri algılayabilmelidir (9):

- Eğer frekans düşmüşse, ve sistemden çıkan net değişim gücü artmışsa, sistem dışında bir yük artması meydana gelmiştir.
- Eğer frekans düşmüşse, ve sistemden çıkan net değişim gücü azalmışsa, sistem içinde bir yük artışı meydana gelmiştir.

Yukarıda ifadeler ışığında net değişim gücü için aşağıdaki tanımlar yapılabilir:

P_{ND} , toplam gerçek net değişim gücü ve P_{SND} istenen yada beklenen net değişim gücü.

$$\Delta P_{ND} = P_{ND} - P_{SND}$$

Buna göre bağlantı hattı-frekans denetimi için özet bir tablo şu şekilde verilebilir (9):

This control action should recognize the following points (9):

- If the frequency decreased and net interchange power leaving the system increased, a load increase has occurred outside the system.
- If frequency decreased and net interchange power leaving the system decreased, a load increase has occurred outside the system.

From the above cases, the following definitions can be made :

P_{ND} is total actual net interchange and P_{SND} is scheduled or desired net interchange power.

[1]

Then a summary table for tie line frequency control can be given as follows (9):

Table 1. Tie Line Frequency Change
Çizelge 1. Bağlantı Hattı-Frekans Denetimi

Δf	ΔP_{ND}	Load Change	Resulting Control Action
-	-	$\Delta P_{L1} + ; \Delta P_{L2} 0$	Increase P_{GEN} in area 1
+	+	$\Delta P_{L1} - ; \Delta P_{L2} 0$	Decrease P_{GEN} in area 1
-	+	$\Delta P_{L1} 0 ; \Delta P_{L2} +$	Increase P_{GEN} in area 2
+	-	$\Delta P_{L1} 0 ; \Delta P_{L2} -$	Decrease P_{GEN} in area 2

İki bölge bir sistem için, birinci bölgede meydana

When a load increase of ΔP_{L1} in area 1, frequency

gelen ΔP_{L1} 'lik bir yük artışı durumunda frekansta ve bağlantı hattından aktarılan güçteki değişim şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\Delta W = \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad [2]$$

$$\Delta P_{ND} = \frac{-\Delta P_{L1} \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad [3]$$

Tablo 1'in birinci satırındaki sonuçlardan birinci bölgedeki yük artışını, yine birinci bölgedeki üretim artışı şeklinde ifade edebiliriz. Bu ifade şu şekilde olmalıdır:

$$\Delta P_{GEN1} = \Delta P_{L1} \quad [4]$$

$$\Delta P_{GEN2} = 0 \quad [5]$$

Üretimdeki değişme, bölge denetim hatası (*area control error, ACE*) olarak da adlandırılan, frekansı ve net değişim gücünü istenen değere götürmek için bölgenin üretimini değiştirmeyi öngörmektedir. Buna göre her bir bölgenin ACE' si aşağıdaki gibi olacaktır:

$$ACE_1 = -\Delta P_{ND1} - B_1 \cdot \Delta W \quad [6]$$

$$ACE_2 = -\Delta P_{ND2} - B_2 \cdot \Delta W \quad [7]$$

Burada B_1 ve B_2 frekans kutuplama çarpanı olarak adlandırılır ve şu şekilde belirtilirler:

$$B_1 = \frac{1}{R_1} + D_1 \quad [8]$$

$$B_2 = \frac{1}{R_2} + D_2 \quad [9]$$

Bu eşitliklerin birlikte yazılımı sonucu her iki bölge için ACE değerleri

deviation and net interchange power can be defined as follows for a two-area system :

We can define the load increase in area 1 as generation increase from the results in first row of Table 1. The statement is:

The required change in generation, called the area control error or ACE, the shift in the area's generation required to restore frequency and net interchange to their desired value. The equations for ACE of each area are as follows:

Where B_1 and B_2 are called as frequency bias factors and defined as follows :

These equations resulted in ACE values for the two-area power systems that can be written as:

$$ACE_1 = \left[\frac{+ \Delta P_{L1} \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right] - \left(\frac{1}{R_1} + D_1 \right) \cdot \left(\frac{- \Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) = \Delta P_{L1} \quad [10]$$

$$ACE_2 = \left[\frac{+ \Delta P_{L1} \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right] - \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right) \cdot \left(\frac{- \Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) = 0 \quad [11]$$

3. DİNAMİK BULANIK AĞLARIN MİMARİSİ

Dinamik bulanık ağlar, bulanık aktivasyon fonksiyonu içeren ve feron (6,7) denilen dinamik elemanlardan oluşmaktadır. Her bir feron, bulanık aktivasyon fonksiyonuna sahip tek bir dinamik sinir hücresi ile temsil edilmektedir. Dinamik feronlar, biyolojik sinir hücrelerine benzemektedirler. Feron girişleri yeterince uyarılırsa, bu modeli tetikler. Uyarma işlemi Hopfield dinamikleri olarak bilinen geri (lag) dinamikler üzerinden gerçekleşir. Bulanık aktivasyon fonksiyonu (ϕ), beyinle ilgili korteks (cerebral cortex) ve beyinin daha dış kısmındaki görsel kortekste (visual cortex) yer alan yenileyici (receptive) alan birimlerine benzer (10,11,12). Bulanık aktivasyon fonksiyonu olan (ϕ), her türlü yeni bilgiye açık olan biyolojik sinir hücresi gibi davranır. Bu bildiride kullanılan bulanık aktivasyon fonksiyonu, tekli (singleton) bulanıklaştırıcı, çarpım karar mekanizması ve merkezi ortalama arındırıcıya sahip Gaussian üyelik fonksiyonlu standart bir bulanık sistemdir ve i.nci ferona ait olan bulanık aktivasyon fonksiyonu, şu şekilde yazılabilir:

3. THE ARCHITECTURE OF A DYNAMIC FUZZY NETWORK

Dynamic fuzzy networks have been used in the meaning of networks that have unconstrained connectivity and have dynamical elements in the fuzzy processing units. The processing unit in the network is called "feuron" (6,7). The feuron represents a single dynamic neuron with fuzzy activation function. The dynamic feuron resembles the biological neuron model. This model fires if the inputs of feurons are excited enough. The firing procedure is done through a lag dynamics such as Hopfield dynamics. Fuzzy activation function ϕ behaves such as a biological neuron which has receptive field units in the visual cortex, in part of the cerebral cortex and in outer parts of the brain (10-11-12). Fuzzy activation function we have used here is a standard fuzzy system that has singleton fuzzifier, product inference engine with Gaussian membership function and center average defuzzifier. The i^{th} activation function with standard fuzzy system can be written as;

$$\phi_i(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^{R_i} a_{ij} \mu_j(x_i)}{\sum_{j=1}^{R_i} \mu_j(x_i)} = \frac{\sum_{k=1}^{R_i} a_{ij} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right)}{\sum_{j=1}^{R_i} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right)} \quad [12]$$

Burada c_{ij} ve σ_{ij} , j.inci yenilikçi (receptive) alan biriminin i.nci feronun merkez ve yayılım parametreleridir.

Aşağıdaki denklemler DBA'nın hesaplama modelini oluşturur:

where c_{ij} is center and σ_{ij} is spread of the j^{th} receptive field unit of the its i^{th} feuron.

The computational model of DFN is given with the following equations;

$$z_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} y_j, \quad i=1,2,\dots,M \quad [13]$$

$$y_i = \phi_i(x_i, \pi_i) = \frac{\sum_{k=1}^{R_i} a_{ij} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right)}{\sum_{j=1}^{R_i} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right)}, \quad i=1,2,\dots,n \quad [14]$$

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, p) = \frac{1}{T_i} [-x_i + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_j + \sum_{j=1}^L p_{ij} u_j + b_i], \quad x_i(0) = x_{i0}, \quad i=1,2,\dots,n \quad [15]$$

Genelde zamanla değişen L giriş sinyalleri, n dinamik feuron birimleri, n baz terimleri, ve M çıkış sinyali vardır. Birimlerin dinamikleri, bunlarla birleşik olarak kendi içlerinden girişler ve diğer birimlerle bağlantılıdır. Bir birimin y_i çıkışı bu birimin durum değişkeninin (x_i) bir aktivasyon fonksiyonudur ($\phi_i(x_i)$). Toplam çıkış ise birimlerin çıkışlarının bir lineer kombinasyonu şeklindedir. p_{ij} j .inci girişin i .inci ferona içten, w_{ij} j .inci ferondan i .inci ferona içten ve q_{ij} ise j .inci ferondan i .inci çıkışa bağlantı ağırlıklarındadır. T_i i .inci feronun zaman sabitesi ve b_i de i .inci feronun birim girişine eklenen baz terimi ya da polarizasyon terimidir. π ise merkez c , yayılım σ ve çıkış merkezi b parametrelerinin oluşturduğu bulanık aktivasyon fonksiyonu parametre setidir. Durum değişkenleri üzerindeki başlangıç şartları $x_i(0)$ açıkça belirtilmelidir.

4. İKİ BÖLGE Lİ ADAPTİF YÜK FREKANS DENETİMİ

Yük frekansı denetimi Şekil 4'te blok diyagramı verilen iki girişli ve iki çıkışlı bir DBA'nın Şekil 5'de görüldüğü gibi güç sisteminde iki bölge arasında bağlanması ile gerçekleştirilmektedir. Önerilen dinamik ağı giriş işareti olarak bölge denetim hatası ve bu hatanın değişimleri uygulanmıştır. DBA model çıkışları iki bölge lü güç sisteminde yük frekans denetimi için gereken sinyalleri üretir. Bu da frekans hatalarından oluşan maliyet fonksiyonunu en aza indiren DBA parametrelerinin belirlenmesi ile olur (Şekil 5). Bu problem için gradyan tabanlı en iyileştirme algoritmaları kullanılmıştır. Performans kriteri veya masraf yapısı olarak şu basit kuadratik form seçilmiştir:

In general, there are L time-varying input signals; n dynamic feuron units, n bias terms, and M output signals. The units have dynamics associated with them, and they receive input from themselves, bias term and from all other units. The output of a unit y_i is a fuzzy activation function $\phi(x_i)$ of a state variable x_i associated with the unit. The output of the overall network is a linear weighted sum of the unit outputs. The bias term b_i is added to the unit inputs. p_{ij} is the input connection weights from j^{th} input to i^{th} feuron, w_{ij} is the interconnection weights from j^{th} feuron to i^{th} feuron and q_{ij} is the output connection weights from j^{th} feuron to i^{th} output. T_i is the dynamic constant of i^{th} feuron and b_i is the bias (or polarization) term of i^{th} feuron. π is the parameters of fuzzy activation function which are centers c , spreads σ and output centers a . The initial conditions on the state variables $x_i(0)$ must be specified.

4. TWO AREAS ADAPTIVE LOAD FREQUENCY CONTROL

Load frequency control is done by a DFN, has two inputs/ outputs and illustrated in Fig. 4, connected between two areas power system as seen in Fig. 5. Area control errors and their changers are applied to proposed DFN as input signals. The outputs of the DFN model generate the control signals for the two are load frequency control. This is done by determining the DFN parameters that minimize the cost functional of load frequency errors (Fig. 5). The gradient-based algorithms have been used for this problem. As a performance index or cost structure is selected in the simple quadratic form as follows:

$$E = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} [z(t) - z^d(t)]^T [z(t) - z^d(t)] dt \quad [16]$$

Burada $e(t)=z(t)-z^d(t)$ güç sistemi yük frekans hata fonksiyonudur. $z(t)$ DBA modeli çıkışı ve $z^d(t)$ ise arzulanan yük frekans cevaplarıdır. Bunun için gereken değişik parametrelere göre masraf duyarlılıklarının hesaplanmasıdır. Bu amaç için kullanılan "Adjoint" yöntemi yeni bir dinamik durum değişkenine λ_i dayanan duyarlılık hesaplamasıdır (7,13-17):

where $e(t)=z(t)-z^d(t)$ is error function for the load frequencies of the power system. $z(t)$ is DFN model response (output), and $z^d(t)$ is desired load frequency responses. We need to compute the cost sensitivities. "Adjoint" method is used for sensitivity computation based on a new dynamical system defined with adjoint state variables λ_i . (7,13-17):

$$-\dot{\lambda}_i = -\frac{1}{T_i} \lambda_i + \frac{1}{T_i} \sum_j w_{ij} y'_j \lambda_j + e_i(t) \sum_j q_{ij} y'_j, \quad \lambda_i(t_f) = 0 \quad [17]$$

$$y'_j = \frac{\partial \phi_j(x_j)}{\partial x_j} = - \left(3\phi_j + 2 \left(\frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j} \right)^2 \right) \left(\frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j^2} \right) \quad [18]$$

Bu denklemlerle tanımlanan adjoint diferansiyel denklemlerinin entegrasyonu ise t_f son zaman değerinden $t_0=0$ ilk zaman değerine zamana geriye doğru gerçekleşmektedir. Bu çalışmada 5. dereceden Runga-Kutta-Butcher entegrasyon algoritması kullanılmıştır (18).

The integration of the adjoint differential equations must be performed backwards in time, from t_f to 0. The size of adjoint vector is n and is independent of network parameters. There are n quadratures for computing the sensitivities. In this study, 5th order Runga-Kutta-Butcher integration rule is used (18).

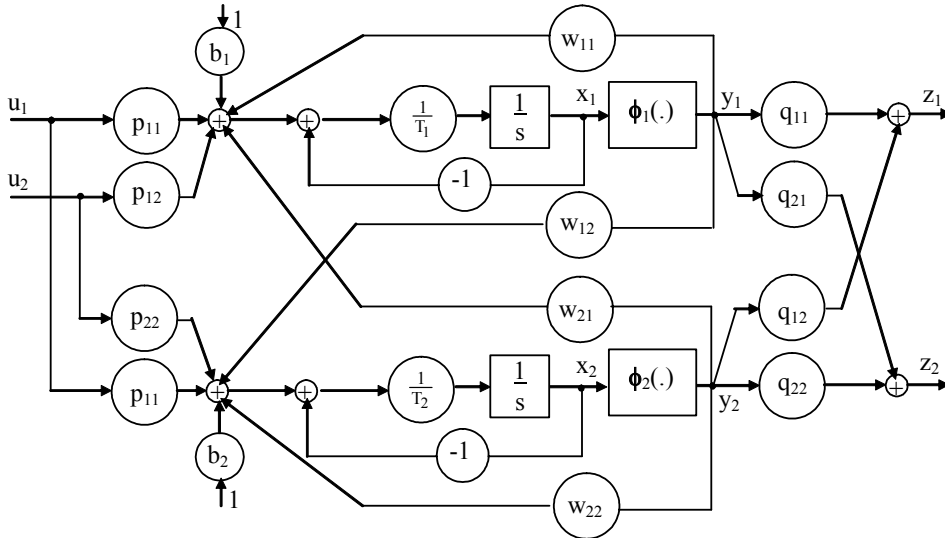


Figure 4. The state diagram of DFN with a two-neuron two-inputs/two-outputs
Şekil 4. İki giriş ve iki çıkışlı dinamik bulanık ağıın durum diyagramı

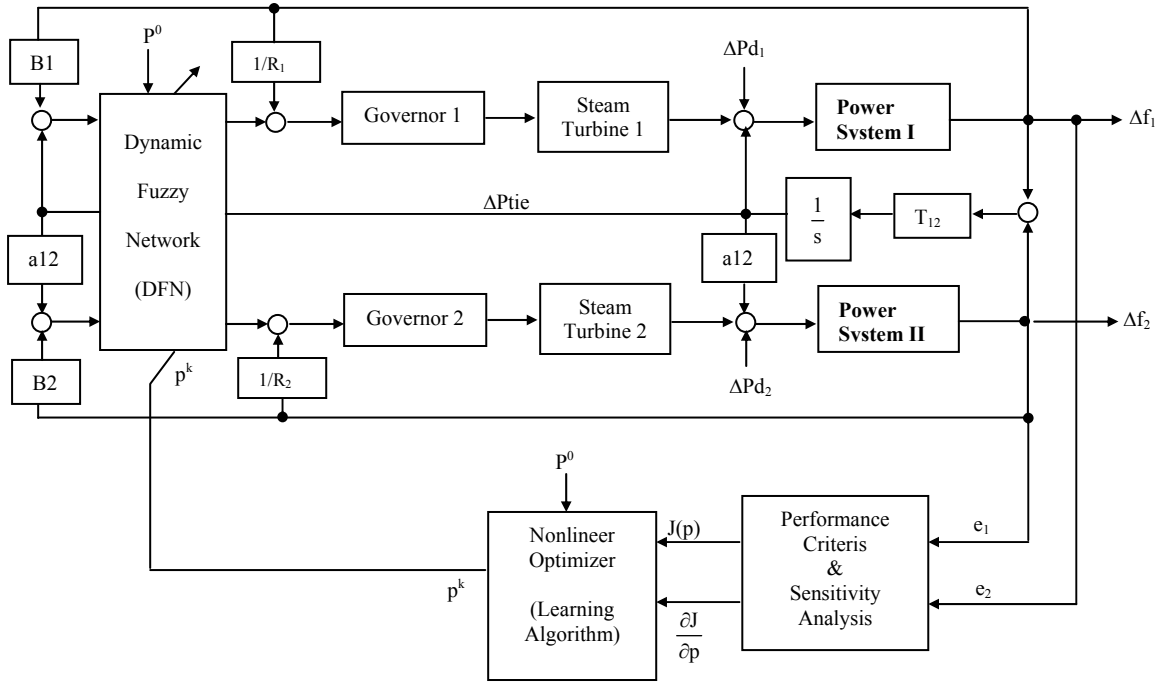


Figure 5. Adaptive load frequency control of a two-area power system with DFN
Şekil 5. İki bölge bir güç sisteminin DBA ile adaptif yük frekansı denetimi

Eğer p tüm ağı parametre vektörü olarak adlandırılırsa, masrafın bu parametre vektörüne göre gradyanı şu formülden hesaplanabilir

If p is called as vector containing all network parameters, the cost gradients with respect to parameters are given by the following formula:

$$\frac{\partial E}{\partial p} = \int_0^{t_f} \left(\frac{\partial f}{\partial p} \right)^T \lambda dt \quad [19]$$

Tüm gradyanlar adjoint vektör hesaplanarak Şekil 5’de verilen iki alanlı güç sisteminin blok diyagramından ve iki bölge güç sistem denklemlerinden (bkz. Ek) kolayca elde edilir. Ağ parametrelerinin güncellenmesinde Broyden-Fletcher-Golfarb-Shanno (BFGS) gradyan yöntemi kullanılmıştır (19). Bu yöntem, eski parametre ve gradyan değişim bilgilerini kullanan ikinci dereceden yaklaşımlı etkin bir yöntemdir.

5. BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ VE SONUÇLARI

Gerçekleştirilen bilgisayar benzetimlerinde, Şekil 4’te görülen iki feuronlu bir dinamik bulanık ağı, yük frekans denetimi için eğitilmiştir. Bu bölümde Şekil 5’deki lineerleştirilmiş güç sistemine %2’lik frekans düşmesini temsil eden bir basamak girişi uygulanmıştır. Bu durum için söz konusu dinamik yapı gerçek zamanlı olmadan eğitilmiş ve bağlantı parametreleri ve zaman sabitleri şu şekilde hesaplanmıştır :

All gradients can easily be derived from the block diagram seen in Fig.5 and two area power system equations (see appendix) and calculating the adjoint vector. Broyden-Fletcher-Golfarb-Shanno (BFGS) gradient method has been used for updating of network weights (19). This method provides the history of parameter and gradient changes yielding approximate second order information.

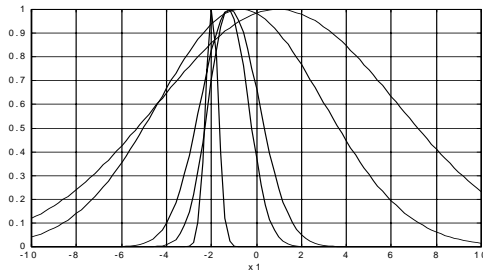
5. COMPUTER SIMULATIONS AND RESULTS

In computer simulation, a DFN with two feurons shown in Fig. 4 were trained for load frequency control. A step disturbance of 2% is applied to system power input of linearized block diagram shown in Fig. 5. Under this condition, DFN was trained offline and interconnection parameters and time constants of the DFN were obtained as:

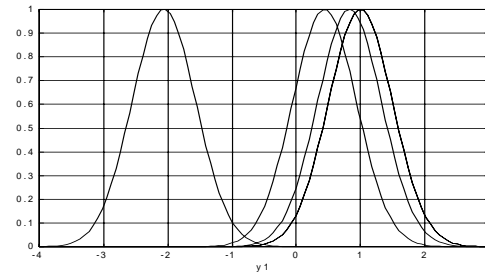
$$w = \begin{bmatrix} 0.015 & 17.215 \\ 0.217 & 1.782 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 4.97 & 0 \\ 0 & -3.01 \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} 0.011 & 0.509 \\ 0.035 & -0.258 \end{bmatrix},$$

$$r = \begin{bmatrix} -3.456 \\ 67.291 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 0.99 & 0 \\ 0 & 3.01 \end{bmatrix}$$

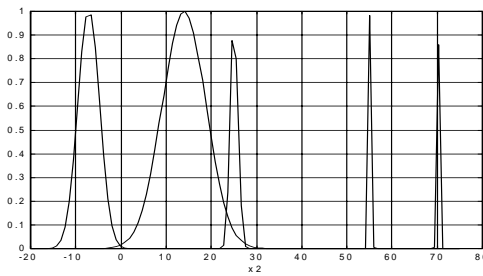
Bu inceleme için bulanık aktivasyon fonksiyonunun giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları şekil 6'daki gibi elde edilmiştir. Bozucu etki altında, klasik PI denetleyicili ve tasarlanan DBA denetleyicili güç sistemlerinin verdiği her iki alandaki frekans değişimleri ve güç akışındaki değişim cevapları Şekil 7-9'da verilmektedir.



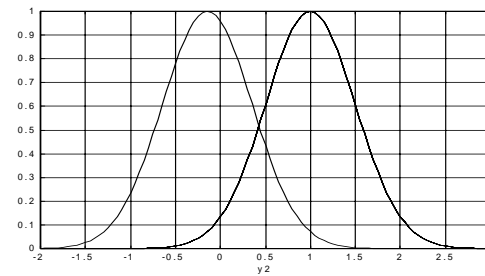
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 6 (a) first feuron input membership functions, (b) first feuron output membership functions, (c) second feuron input membership functions, and (d) second feuron output membership functions.

Şekil 6 (a) Birinci feuron giriş üyelik fonksiyonu, (b) Birinci feuron çıkış üyelik fonksiyonu, (c) İkinci feuron giriş üyelik fonksiyonu, (d) İkinci feuron çıkış üyelik fonksiyonu

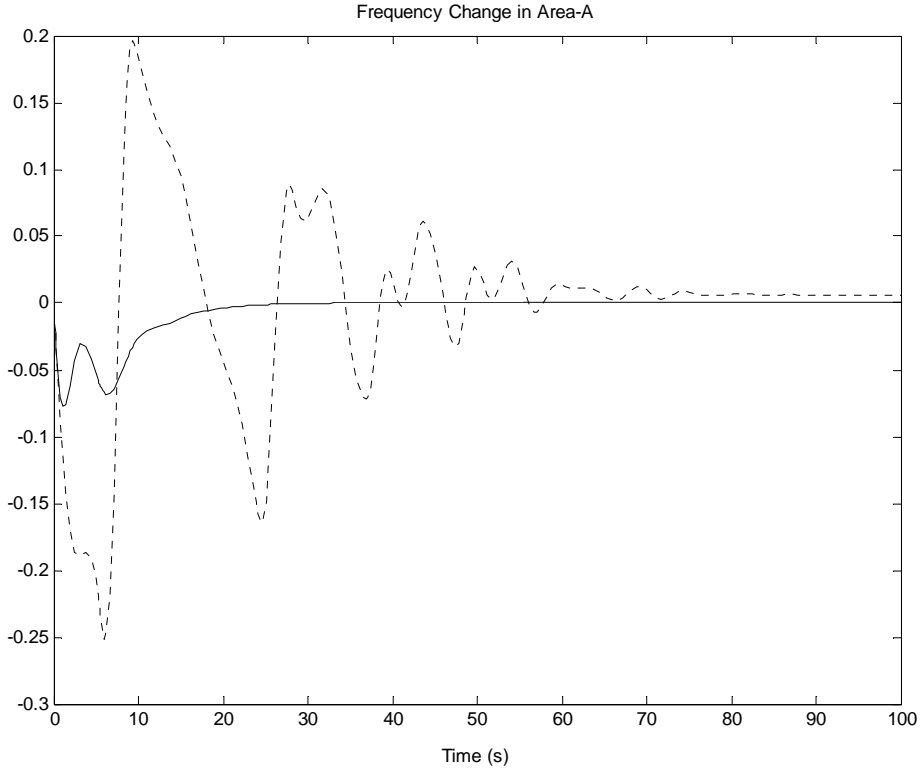


Figure 7. Frequency change in Area 1 (2% step change in power demand, DFN solid line, Integral dotted line)
Şekil 7. Bölge-1'deki Frekans Değişimi (%2'lik güç değişimi, DBA kalın çizgili, klasik PI kısa çizgili)

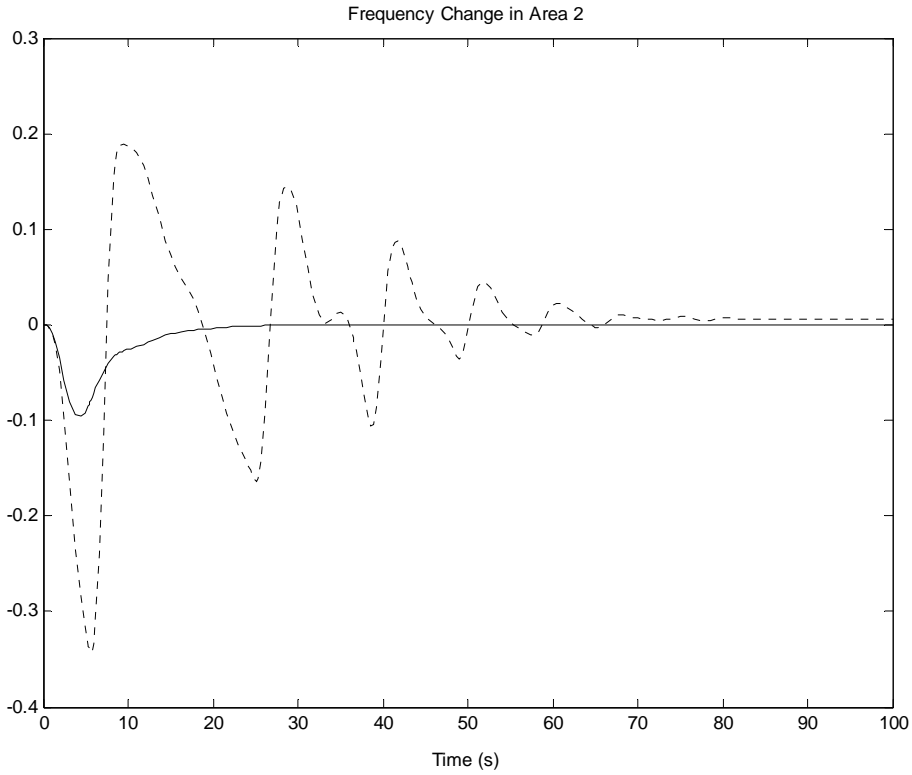


Figure 8. Frequency change in Area 2 (2% step change in power demand, , DFN solid line, Integral dotted line)
Şekil 8. Bölge-2'deki Frekans Değişimi (%2'lik güç değişimi, DBA kalın çizgili, klasik PI kısa çizgili)

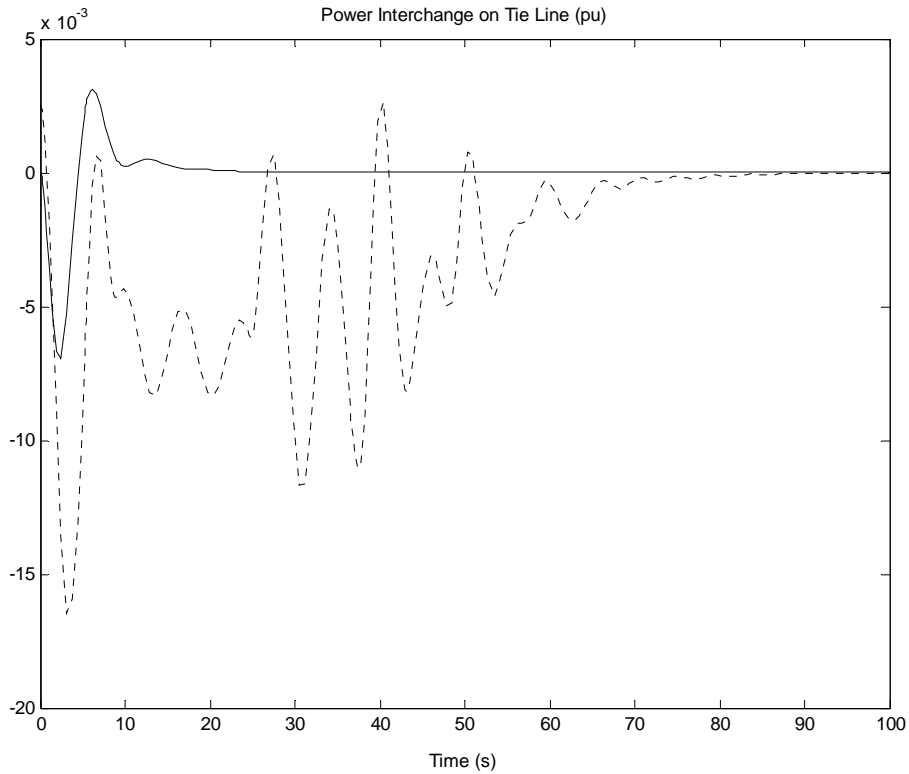


Figure 9. Tie Line Power (2% step change, DFN solid line, Integral dotted line)

Şekil 9. Hattaki Güç Akışı Değişimi (%2'lik güç değişimi, DBA kalın çizgili, klasik PI kısa çizgili)

Bu benzetim sonuçları, önerilen yük frekans denetleme sisteminin klasik integral denetleyiciden daha hızlı cevap verdiğini ve frekanstaki değişimlerin daha sınırlı kaldığını göstermektedir. Önerilen DBA tabanlı yeni denetleyici, klasik denetim sistemine göre oldukça iyi bir frekans denetimi gerçekleştirmiştir.

6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yük frekans denetiminde alternatif ve başarılı bir denetleyici önerilmiştir. Söz konusu yeni denetleyici ile aktif güçteki değişimlerin sonucunda enerji bölgelerindeki frekans değişimleri daha az olmakta ve kısa sürede sönümlenebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan dinamik bulanık ağların en önemli avantajları yeni durumlara kolayca uyum sağlaması ve kolayca eğitilebilmesinin yanı sıra donanım olarak gerçekleştirilmesinin mümkün olabilirdir. Özellikle VLSI ile basit ve kolay biçimde sürekli zamanda dinamik bulanık ağların gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir (11,20).

Bu çalışmada bundan sonraki aşamalarda yapılması önerilen konular ise daha geniş alanlı (3 veya daha fazla) enterkonnekte sistemlere uygulanabilme ve benzetim ortamından donanım ortamına geçerek uygulamaya konulmasıdır. Bunun yanı sıra bu çalışmada incelenen buhar türbinlerinden başka, su, gaz ve rüzgar türbinleri içeren sistemlerde yük frekans denetimi, ileri aşamadaki araştırma konularıdır.

These two simulation results show that the proposed load frequency controller responds faster than classical integral controller and frequency variations are smaller than classical controller.

6. DISCUSSIONS AND CONCLUSION

An alternative and successful controller for load frequency control is proposed. The proposed controller causes less frequency drop than integral controller and oscillations in frequency rapidly damp out. Proposed networks can be easily trained and adapted to different disturbance cases online. There is one other important motivation for investigating dynamic fuzzy networks for load frequency control in power systems is that they suggest a simple hardware implementation. It is the simple and plausible VLSI implementation for a continuous-time dynamic fuzzy network (11,20).

Proposed study areas are the applications to three or more areas power systems and the hardware implementations. Also, load frequency control applications in hydro, gas and wind power plants are advanced research areas.

KAYNAKLAR/REFERENCES

1. Chang C.S., and Weihui F., "Area Load Frequency Control Using Fuzzy Gain Scheduling of PI Controllers", *Electric Power System Research*, 42 (2):145-152 (1997).
2. Chang C.S., Weihui F., and Fushuan W., "Load Frequency Control Using Genetic Algorithm Based Fuzzy Gain Scheduling of PI Controllers", *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 26, No 1: 39-52 (1998).
3. El-Sherbiny M.K., El-Saady G., and Yousef A.M., "Efficient Fuzzy Logic Load Frequency Controller", *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 14: 1853-1863 (2002).
4. Chaturvedi D.K., Satsangi P.S., and Kalra P.K., "Load Frequency Control: A Generalized Neural Network Approach", *Int. Journal of Electrical Power Systems*, Vol. 21, No.6: 405-415 (1999).
5. Oysal, Y., Yilmaz, A.S., and Koklukaya, E., Fuzzy PID Controller Design for Load Frequency Control using Gain Scaling Technique, *PowerTech Conference*, Budapest, Hungary (1999).
6. Oysal Y, Feuro Modeling and Optimal Fuzzy Control, Ph.D. Thesis, *Sakarya University, Institute of Science and Technology*, Sakarya/Turkey ,15-25 (2002).
7. Oysal Y, Becerikli Y, Konar AF, and Samad T, Dynamic Fuzzy Networks for Real Time Application, submitted to *Neural Network* (2003).
8. Kundur, P., *Power System Stability and Control*, , **Mc Graw Hill**, 621-636 (1994).
9. Wood, A.J., Wollenberg, B.F., *Power Generation, Operation and Control, Second Edition*, , **John Wiley and Sons**, 328-362 (1996).
10. Hopfield, J.J., *Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities*, *Proc. of the National Academy of Sciences*, Vol. 79, 2554-2558 (1989).
11. Hopfield, J.J., *Neurons with Graded Response Have Collective Computational Properties Like Those of Two-State Neurons*, *Proc. of the National Academy of Sciences*, Vol. 81, 3088-3092 (1984).
12. Passino, K.M., and Yurkovich, S., *Fuzzy Control*, **Addison-Wesley**, MenloPark, Cal., 423-424 (1998).
13. Becerikli, Y., Oysal, Y., and Konar, F., "On a Dynamic Wavelet Network and Its Modeling Applications", submitted to *Neuro Processing Letters* (2003).
14. Becerikli, Y., Oysal, Y., and Konar, F., Modeling of Nonlinear Systems with Dynamic Wavelet Networks, *Proc. Turkish Symposium on Automatic Control*, Vol.1, Ankara, METU, 71-79.
15. Konar, A.F., Becerikli, Y. and Samad, T., "Trajectory Tracking with Dynamic Neural Networks", *Proc. of the 1997 IEEE Int. Sym. on Intelligent Control (ISIC'97)*, Istanbul/Turkey (1997).
16. Becerikli, Y., Konar, A.F., and Samad, T., Intelligent Optimal Control with Dynamic Neural Networks, *Neural Networks*, Vol.16: 251-259 (2003).
17. Konar, A.F., and Samad, T., "Dynamic Neural Networks", Technical Report SSDC-92-I 4152-2, **Honeywell Technology Center**, 3660 Technology Drive, Minneapolis, MN 55418 (1992).
18. Chapra, S.C., and Canale, R.P., *Numerical Methods for Engineers*, **McGraw-Hill**, 134-140 (1989).
19. Edgar, T.F., and Himmelblau, D.M., *Optimization of Chemical Processes*, **McGraw-Hill**, 222-223 (1988).
20. Anderson JA, and Rosenfeld, *Neurocomputing: Foundation of Research*, **MIT Press** Cambridge, MA, 274-286 (1988).

EK/ APPENDIX**-Turbine Governor Model**

$$G_{TUR}(s) = \frac{1}{1 + sT_T} \frac{1 + sK_T \cdot T_{TT}}{1 + sT_{TT}} \quad [\text{A-1}]$$

$$G_{GOV}(s) = \frac{1}{1 + sT_G} \quad [\text{A-2}]$$

$T_{T1}=T_{T2}=0.3$ s, $T_{TT1}=T_{TT2}=20$ s, $K_{T1}=K_{T2}=0.3335$, $T_{G1}=T_{G2}=0.2$ s, $R_1=R_2=2.43$, $B_1=B_2=0.425$, $K_{P1}=K_{P2}=120$, $T_{P1}=T_{P2}=20$ s.

Received/ Geliş Tarihi: 22.05.2003 Accepted/Kabul Tarihi:09.01.2004