

# KLASİK PID VE BULANIK MANTIK KONTROLÖR İLE SENKRON MAKİNA KONTROLÜ

Fazıl KAYTEZ<sup>1</sup>, Haluk GÖZDE<sup>2</sup>, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Trakya Elektrik Dağıtım A.Ş Genel Müdürlüğü, Tekirdağ, [fazilkyt77@yahoo.com](mailto:fazilkyt77@yahoo.com)

<sup>2</sup> 4ncü Ana Bakım Merkezi Komutanlığı, Ankara, [halukgozde@yahoo.com](mailto:halukgozde@yahoo.com)

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, [taplam@gazi.edu.tr](mailto:taplam@gazi.edu.tr)

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık, Senkron makina, PID kontrol.

**ÖZET:** Bu çalışmada; generatör çalışma durumunda olan bir senkron makinenin görünür kutup d-q eksenlerine göre matematiksel modeli oluşturularak, makinenin uyartım devresinin kontrolünde kullanılan klasik kontrol sistemleri ve kendi kendine ayarlanabilen bulanık mantık kontrol sistemleri karşılaştırılmıştır. Örnek sistem MATLAB-Simulink'de simule edilen bir model ile verilmiştir. Senkron makinenin çıkış akımı, gerilimi, gücü, reaktif gücü, yük açısı, rotor hızı, elektriksel torku ve hatadaki değişiminin sabit durum şartında, geçiş zamanına göre karşılaştırılması yapılmıştır.

## GİRİŞ

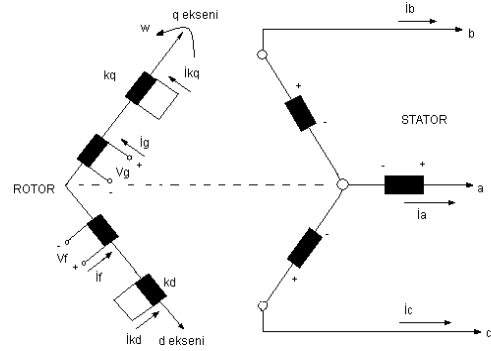
Endüstriyel bir denetim mekanizması tasarlanırken, öncelikle ilgili sürecin dinamik modelinin oluşturulması gerekir. Ancak, uygulamada bu her zaman mümkün olmaz. Endüstriyel süreç içerisindeki olaylar matematiksel modellemeye izin verecek ölçüde bilinmeyebilir veya bir model tasarımı yapılsa bile bu modelin parametreleri zaman içerisinde büyük değişiklikler gösterebilir. Bazı durumlarda, doğru bir dinamik model tasarlanırsa da, kontrolör tasarımında kullanılması karmaşık problemlere neden olabilir. Buna benzer sorunlarla karşılaşıldığında, genellikle uzman bir kişinin deneyim ve bilgilerinden faydalanma yoluna gidilir. Uzman; dilsel niteleyiciler olarak tanımlanan ve az, çok az, biraz, fazla, çok fazla gibi günlük hayatımızda çok sıklıkla kullandığımız bu tür nitelemeler doğrultusunda esnek bir denetim mekanizması geliştirir. Bu tür mantıksal ilişkiler temeli üzerine kurulan Bulanık Mantık Kuramı; mühendislik deneyim ve tecrübelerini, bilinen sistem modelleme anlayışı ile birleştirmenin sonucu olarak, kontrol edilen sistemin performansını arttırması, mevcut olan tasarımlara yeni işlevler kazandırması ve özellikle sistem geliştirme sürecini ve ürünü piyasaya sunma süresini, ileri geliştirme programları kullanarak kısaltması nedeniyle avantajlıdır [1].

Elektrik makineleri kontrolü için kullanılan klasik kontrolörler, matematik modelleriyle geliştirilmiş olmalarına karşın bazı çalışma şartlarında, özellikle doğrusal olmayan ve/veya kompleks sistemler için yetersiz kalmıştır. Bu sebeple, bulanık mantık denetim elemanları elektrik makinelerinin kontrolü için güçlü bir tasarım tekniği oluşturmuştur. Elektrik makinelerinin kontrolünde, bulanık mantık denetim elemanlarının kullanımıyla önemli gelişmeler sağlanmıştır [2].

Bu çalışmada; bulanık mantık denetim elemanının etkilerini görmek amacıyla generatör çalışma durumunda işletilen senkron makinenin değişik işletme şartları altında simülasyonu yapılarak, klasik PID (Proportional Integral Derivative) kontrolöre göre çalışma performansı ve dinamik davranışı incelenmiştir.

## SENKRON MAKİNANIN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Senkron makineler, genel olarak, elektrik enerjisi üretmek amacıyla generatör olarak çalıştırılırlar. Senkron generatör, prensipte mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrik makinesidir. Senkron makinelerin elektrik ve elektromekanik davranışı, üç fazlı senkron makineyi belirleyen denklemlerden tahmin edilebilir. Üç fazlı senkron makineler endüstride yaygın olarak kullanılır ve maliyetleri yüksek olmasına rağmen, yüksek güç oranlarında verimleri oldukça yüksektir. [3, 4].



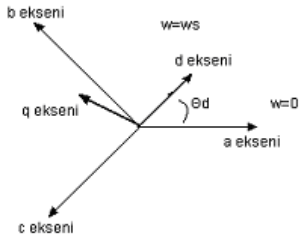
Şekil 1. Senkron makinenin eşdeğer devre modeli.

Çalışmada, senkron makinenin simülasyonu için dq0 modeli kullanılmış ve bunun için, gerilim denklemleri sabit olan stator a, b, c faz sargılarına ilişkin denklemler, Eşitlik.1'de belirtilen simetrik park dönüşümleri ile rotorla birlikte hareket eden dq0 eksen takımına göre uyarlanmıştır. Dönüşümde temel ilke, rotor ve stator arasındaki bağıl hareketi ortadan kaldırmak için rotor ve stator büyüklüklerini aynı referans eksen takımına taşımaktır [3].

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}(\theta_d)] [f_{abc}] \quad (1)$$

Burada,  $\theta_d$  açısı d-ekseni ile a-ekseni arasındaki açıdır. Senkron makinenin generatör çalışma durumunda

dq0 ile abc eksen takımları arasındaki ilişki Şekil 2’de gösterilmiştir [3].



Şekil 2. Generatör çalışma durumunda dq0 ile abc eksen takımları arasındaki ilişki.

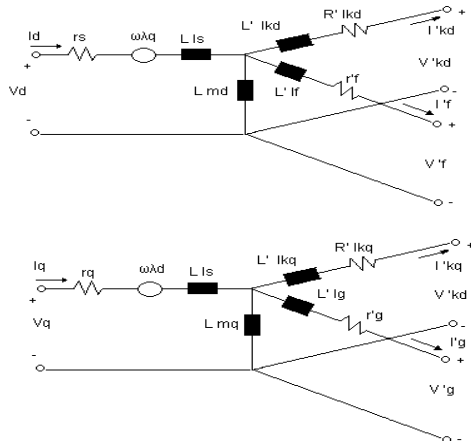
Generatör çalışma durumunda, q-ekseni d-ekseninden 90° ileride olduğundan q ve a eksenleri arasındaki açı  $\theta_q$  ile  $\theta_d$  arasında  $\theta_q = \theta_d + \pi/2$  gibi bir ilişki olur. Rotor sargısının eksenleri d ve q eksenleridir ve dq0 eksen takımına dönüşüm, stator sargı büyüklüklerine uygulanır. Buna göre sabit kısımda bulunan statorun a-ekseni ile hareketli kısımda bulunan q-ekseni arasındaki açı  $\theta_r$ , rotorun hızına bağlı olarak değişecek, stator sargısının büyüklükleri de bu açının aldığı değere göre değişecektir. Buna göre park dönüm matrisi Eşitlik.2’deki gibi yazılır [3-5].

$$[T_{dq0}(\theta_r)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta_r & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

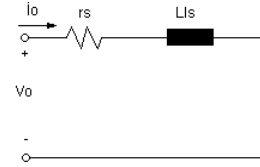
Senkron makinenin stator devresine ait akı, gerilim, akım büyüklüklerinin dq0 eksen takımına dönüşümü aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [5].

$$\begin{aligned} v_{dq0} &= T_{dq0}(\theta_r) v_s \\ i_{dq0} &= T_{dq0}(\theta_r) i_s \\ \Lambda_{dq0} &= T_{dq0}(\theta_r) \Lambda_s \end{aligned} \quad (3)$$

Senkron makinenin dq0 eksen takımındaki eşdeğer devreleri ise Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterildiği biçimdedir [5].



Şekil 3. Senkron makinenin d ve q eksen eşdeğer devreleri.

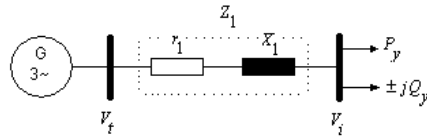


Şekil 4. Senkron makinenin 0 eksen eşdeğer devresi.

## PID VE BULANIK MANTIK İLE SENKRON MAKİNA KONTROLÜ

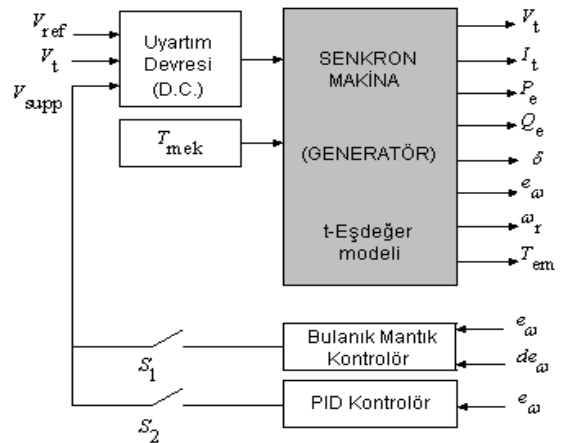
Senkron makinenin simülasyonu, generatör çalışma modunda, t-eşdeğer generatör modeli kullanılarak bir güç barasına bağlanarak gerçekleştirilmiştir. Senkron makinenin kontrolünü sağlamak için PID ve bulanık mantık kontrol elemanları direkt olarak, senkron makinenin uyarım devresinin girişlerine uygulanmıştır.

Senkron generatörün güç barasına bağlantı modeli Şekil 5’te gösterilmiştir. Bu modelde  $V_t$  generatör çıkış gerilimini,  $V_f$  bara gerilimini, P ve Q sistem yükünü,  $x_i$  iletim hattının endüktif reaktansını ve  $r_i$  ise iletim hattının rezistansını ifade etmektedir [4].



Şekil 5. Senkron generatörün güç barasına bağlantı modeli.

Buna göre generatör modunda çalışan senkron makinenin t-eşdeğer modeli kullanılarak, kontrol için geliştirilen simülasyon modeli Şekil 6’daki gibi elde edilmiştir.

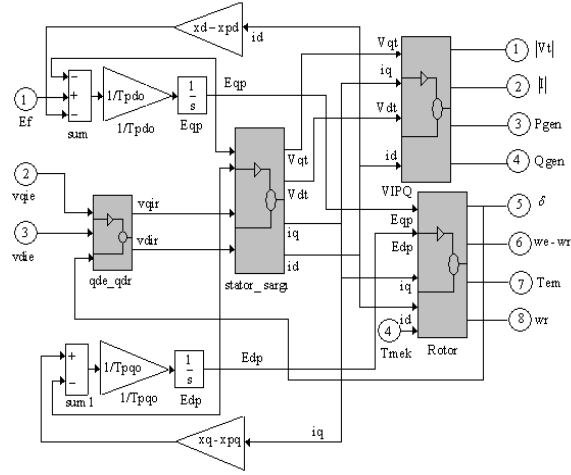


Şekil 6. Senkron generatörün simülasyon modeli.

Burada;  $I_t$  generatör çıkış akımını,  $P_e$  ve  $Q_e$  generatörde üretilen gücü,  $\delta$  yük açısını,  $e_w$  senkron hızla rotor hızı arasındaki hatayı,  $de_w$  hız hatasının zamana göre değişimini,  $w_r$  elektriksel açısal hızı,  $T_{em}$  üretilen momenti,  $T_{mek}$  generatörün girişindeki

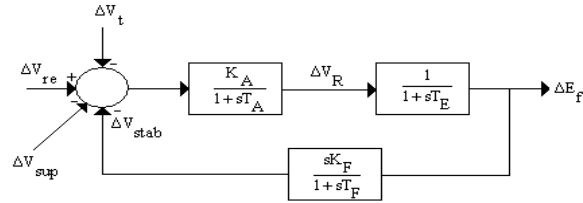
momenti,  $V_{ref}$  referans giriş gerilimini ve  $V_{supp}$  kontrol gerilimlerini ifade etmektedir.

Şekil 7’de senkron generatörün t-eşdeğer modelinin simülasyon bloğu gösterilmiştir [5].

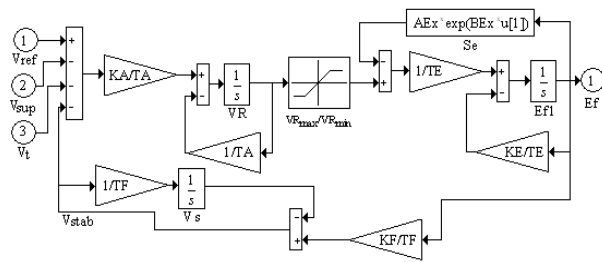


Şekil 7. Senkron generatör t-eşdeğer modelinin simülasyon bloğu.

DC uyarım sisteminin transfer fonksiyonu blok şeması ve simülasyon bloğu Şekil 8’de ve Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 8. DC uyarım sisteminin transfer fonksiyonu blok şeması.



Şekil 9. DC uyarım sisteminin simülasyon bloğu.

Simülasyon bloklarının oluşturulmasının ardından senkron generatör,  $r_1 = 0.028$  pu. ve  $x_1 = 0.11$  pu. olan bir bara sistemine bağlanarak çeşitli yüklerde klasik PID kontrolör ve bulanık mantık kontrolör ile kontrol edilerek çıkış büyüklükleri karşılaştırılmıştır.

Generatörün klasik kontrolü için bir PID kontrolör kullanılmıştır. Klasik denetim sistemlerinde; özellikle analog işaretlerle çalışan klasik sistemlerde, sistemin matematiksel modellenmesi şarttır. Bu matematiksel model, zaman domeninde sistem parametreleri değişmiyor ve doğrusal ise; diferansiyel denklemlerle

veya durum denklemleri ile ifade edilir ve s domeninde Laplace dönüşümü alınarak, oluşturulan transfer fonksiyonlarıyla tanımlanır. Sürekli işaretlerle çalışan kontrol sistemlerinin analizi bu modelle çözümlenir [6, 7].

Tasarlanan sistemde, bulanık mantık kontrolörün girişleri rotor hızı ile senkron hız arasındaki fark  $e_w$  ve hatanın ayırık transfer fonksiyon bloğu ile ters z transformasyonuna çevrilmesi sonucu elde edilen hatadaki değişim  $de_w$ ’den oluşturulmuş; çıkışı ise  $du$  olarak tanımlanmıştır.

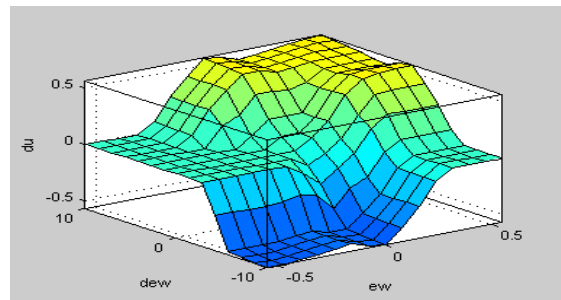
Tasarlanan bulanık mantık kontrolörü için;  $e_w$  ve  $de_w$  sinyallerinin kombinasyonlarıyla oluşturulan kural tabanına göre, sistem çıkışına ilişkin bulanık kontrol kural tablosu Çizelge 1’deki gibi elde edilmiştir. Çıkıştaki salınımları engellemek için senkron generatörün çıkış değerlerinin durumuna göre 9 adet ana kurala ek olarak 2 adet daha kural yazılarak 11 adet kural oluşturulmuştur.

Çizelge 1: Bulanık kontrol kural tablosu.

- |     |   |
|-----|---|
| 1.  | Eğer $e_w$ =Negatif ve $de_w$ =Negatif ise, o halde $du$ =Negatif |
| 2.  | Eğer $e_w$ =Negatif ve $de_w$ =Normal ise, o halde $du$ =Negatif  |
| 3.  | Eğer $e_w$ =Negatif ve $de_w$ =Pozitif ise, o halde $du$ =Normal  |
| 4.  | Eğer $e_w$ =Normal ve $de_w$ =Negatif ise, o halde $du$ =Negatif  |
| 5.  | Eğer $e_w$ =Normal ve $de_w$ =Normal ise, o halde $du$ =Normal    |
| 6.  | Eğer $e_w$ =Normal ve $de_w$ =Pozitif ise, o halde $du$ =Pozitif  |
| 7.  | Eğer $e_w$ =Pozitif ve $de_w$ =Negatif ise, o halde $du$ =Normal  |
| 8.  | Eğer $e_w$ =Pozitif ve $de_w$ =Normal ise, o halde $du$ =Pozitif  |
| 9.  | Eğer $e_w$ =Pozitif ve $de_w$ =Pozitif ise, o halde $du$ =Pozitif |
| 10. | Eğer $e_w$ =Negatif ve $de_w$ =Normal ise, o halde $du$ =Negatif  |
| 11. | Eğer $e_w$ =Negatif ve $de_w$ =Normal ise, o halde $du$ =Pozitif  |

Bulanık kontrolde, kontrolden iyi performans elde etmek için daha fazla kural oluşturmak gerekmektedir. Ancak kural sayısı arttıkça sistemi kontrol etme güçlüğü de doğmaktadır [8-12].

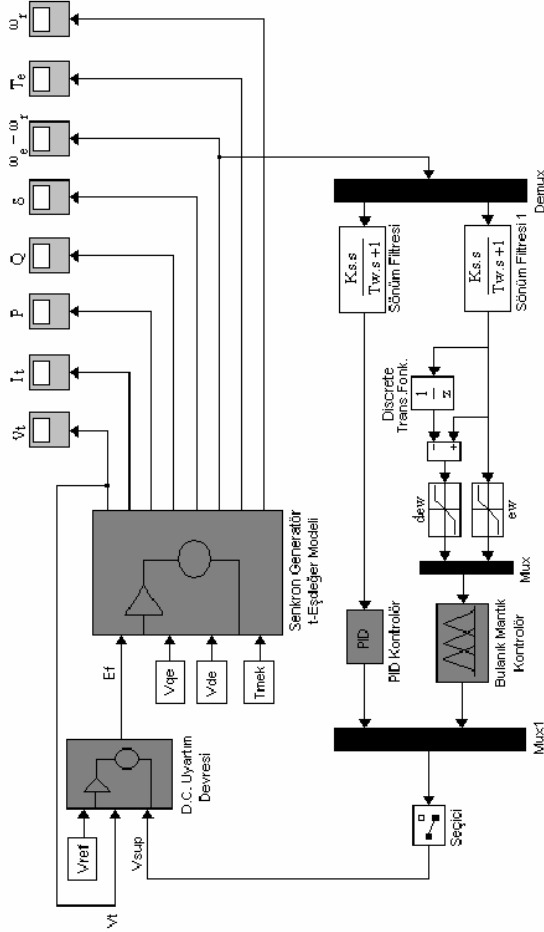
Oluşturulan kurallar sonucu giriş ve çıkışa ait kontrol yüzeyi Şekil 10’daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 10. Bulanık kontrolörde giriş ve çıkışa ait kontrol yüzeyi.

Bulanık mantık kontrolör çıkışlarından istenilen gerçek değerleri, diğer deyişle bulanık olmayan değerleri bulmak için, ağırlıkların ortalaması metodunu (COG) kullanarak gerçek değerlere dönüştürme yapılmıştır.

Klasik PID kontrolör ve bulanık mantık kontrolörlerin tasarımlarının ardından senkron generatörün kontrolü için Şekil 11'deki simülasyon bloğu oluşturulmuştur. Simülasyona başlanmadan önce başlangıç değerleri tespit edilmiştir.

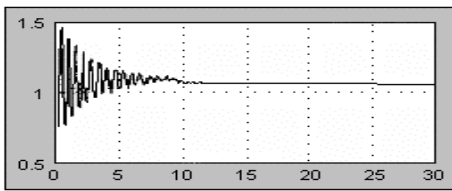


Şekil 11. Kontrol simülasyon bloğu.

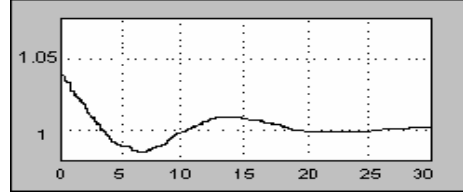
## SİMÜLASYON SONUÇLARI

Simülasyon sonunda PID kontrolör ve bulanık mantık kontrolör ile elde edilen sonuçların grafiksel olarak karşılaştırılması yapılmış ve senkron generatörün rotoruna dışardan uygulanan mekanik enerjinin sabit olması şartı ile rotor hızının kararlı bir duruma gelene kadar generatör çıkışında meydana gelen dinamik davranışlar gözlenmiştir.

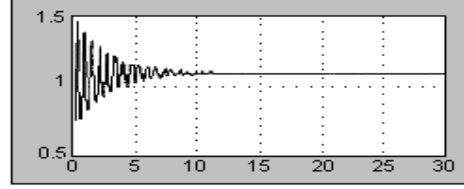
Sistem ilk olarak kontrolsüz olarak  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çalıştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 12. Kontrolsüz  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış akımı ( $I_t$ ).



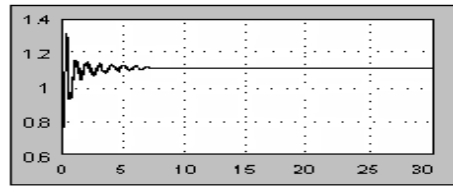
Şekil 13. Kontrolsüz  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış gerilimi ( $V_t$ ).



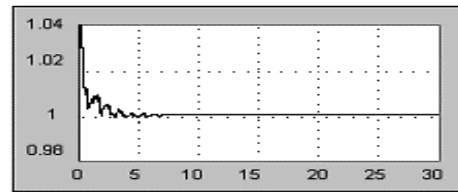
Şekil 14. Kontrolsüz  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış gücü ( $P_e$ ).

Kontrolsüz durumda çıkış büyüklüklerindeki dalgalanmanın fazla olduğu görülmüştür. Bu dalgalanmaların, senkron hız ile rotor hızı arasındaki hata değişiminden dolayı oluştuğu değerlendirilmiştir.

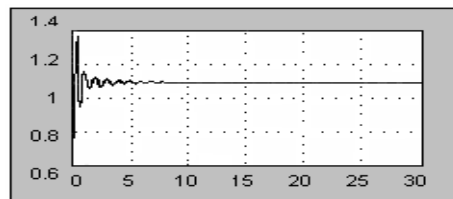
Sistem daha sonra PID kontrolör ile  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çalıştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Eğrilerden de görüldüğü gibi çıkıştaki istenmeyen dalgalanmalar azaltılmıştır.



Şekil 15. PID kontrolör ile  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış akımı ( $I_t$ ).

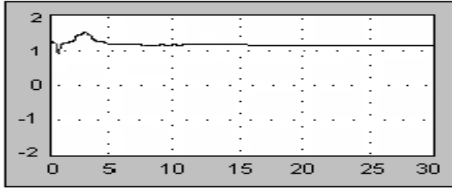


Şekil 16. PID kontrolör ile  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış gerilimi ( $V_t$ ).

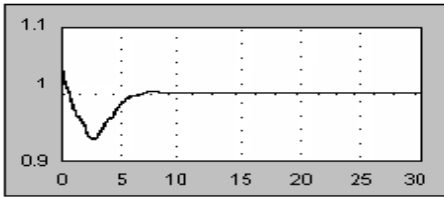


Şekil 17. PID kontrolör ile  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış gücü ( $P_e$ ).

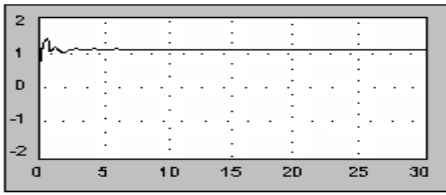
Ardından, sistem bulanık mantık kontrolör ile  $S=1+j0$  p.u ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çalıştırılmış ve aşağıdaki değerler elde edilmiştir.



Şekil 18. Bulanık mantık kontrolör ile  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış akımı ( $I_t$ ).



Şekil 19. Bulanık mantık kontrolör ile  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış gerilimi ( $V_t$ ).



Şekil 20. Bulanık mantık kontrolör ile  $S=1+j0$  p.u. ( $\text{Cos}\phi=1$ ) yük değerinde çıkış gücü ( $P_e$ ).

Eğrilerden görüldüğü gibi, çıkış büyüklüklerindeki salınımlar azalmış ve arzu edilen çalışma noktası bulanık mantık kontrol elemanı ile büyük ölçüde sağlanmıştır.

## SONUÇ

Çalışmada; generatör çalışma durumunda işletilen bir senkron makinenin değişik işletme şartları altında, klasik PID (Proportional Integral Derivative) kontrolör ve bulanık mantık kontrolör ile kontrol edilmesiyle, çalışma performansı ve dinamik davranışı incelenmiştir. Senkron makinenin matematiksel modeli, d-q ekseninde ve zaman domeninde yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında generatörün t-eşdeğer modeli, PID ve bulanık mantık kontrolöre uygunluğu açısından tercih edilmiştir.

Sistem ilk olarak kontrolsüz çalıştırılmış ve generatörün çıkışlarında büyük salınımlar meydana geldiği gözlenmiştir.

Salınımları azaltmak için klasik PID kontrolör tasarlanarak değişik yük durumlarında sisteme

uygulanmış ve kontrolsüz duruma göre çıkış büyüklüklerindeki salınımlar azaltılmıştır.

Ardından, bir bulanık mantık kontrolör tasarlanarak sisteme uygulanmıştır. Kontrolün bulanık mantık kontrolör ile yapılmasıyla, çıkış büyüklüklerindeki salınımlarda azalmalar görülmüş ve istenilen sönüm karakteristiği elde edilmiştir. Salınımdaki bu azalmalar, elektrik üretiminin daha kaliteli ve kesintisiz olmasını sağlamıştır.

Özellikle işletme şartlarına göre, PID kontrolörde elemanların parametrelerini sürekli ayarlamak gerekirken, bulanık mantık kontrolör işletmenin şartlarına göre kendi kendine ayarlanmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Elmas, Ç., "Bulanık Mantık Denetleyiciler", *Seçkin, Yayıncılık*, Ankara, 24-103 (2003).
- [2] Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility", University of California, *Electronics Research Lab.*, Berkeley, Memo.M:77-12 (1977)
- [3] Krause, P.C., "Analysis of Electrical Machinery", University of Purdue *Mc Graw-Hill Book Company*, Purdue, 10-25 (1987).
- [4] Sarioğlu, K., "Elektrik Makinalarının Temelleri-II", *İTÜ Elektrik Fakültesi Yayını*, İstanbul, 23-86 (1983).
- [5] Mun Ong, C., "Dynamic Simulation of Electric Machinery", *Prentice Hall PTR*, New Jersey, 5-56 (1998).
- [6] Sarioğlu, K., "Otomatik Kontrol I-II", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 15-78 (1997).
- [7] Astrom, K., Hang, C., Persson, P., Ho, W., "Towards Intelligent PID Control", *Automatica*, 28(1):1-9 (1992).
- [8] Miranda, V., Saraiva, J.T., "Fuzzy Modeling of Power Systems Optimal Load Flow", *IEEE Transaction on Systems*, 7(2):843-849 (1991).
- [9] Lakshimi, P., Khan, M.A., "Design of a Robust Power Systems Stabilizer Using Fuzzy Logic for Multi-Machine Power System", *Electric Power Systems Research*, Tokyo, 39-46 (1998).
- [10] Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets Information and Control", *Academic Press*, New York, 338-353 (1965).
- [11] Zadeh, L.A., "Fuzzy Logic=Computing With Words", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(2): 103-111 (1996).
- [12] Lee, C.C., "Fuzzy Logic in Control Systems, Fuzzy Logic Controller", *IEEE Transactions on Systems*, New York, 404-436 (1990).