



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26/09/2018
Kabul Tarihi : 18/12/2018

Received Date : 26/09/2018
Accepted Date : 18/12/2018

Üç Seviyeli D-STATKOM'un Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici ile Denetimi ve Performans Analizi

Control and Performance Analysis of Three-Level D-STATCOM using Type-2 Fuzzy Logic Controller

Hakan AÇIKGÖZ^{1*}

¹Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik-Enerji Bölümü, Kilis, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hakan AÇIKGÖZ, hakanacikgoz@kilis.edu.tr

ÖZET

Reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan ve dağıtım sistemine paralel olarak bağlanan D-STATKOM'un denetimi oldukça önemlidir. Genel olarak bu amaç için sabit parametrelere sahip Oransal+İntegral (PI) denetleyiciler kullanılmaktadır. Fakat bu denetleyici yapılarının istenilen performansa sahip olmadıkları da bilinmektedir. Günümüzde ise, akıllı denetleyici yapıları kullanılmaktadır ve D-STATKOM'un denetiminde de tercih edilmektedir. Bu çalışmada, belirsizlikleri içeren durumların denetiminde oldukça iyi performansa sahip olan Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici (T2BMD) yapısı tasarlanmıştır. Önerilen denetleyici yapısı D-STATKOM'un hem DA-bara geriliminin hem de dq eksen akımlarının denetiminde kullanılmıştır. Ayrıca, aynı şartlar altında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve farklı senaryolar oluşturulmuştur. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, önerilen denetleyici yapısı D-STATKOM'un performansını oldukça iyileştirmiş ve sistemin dayanıklılığını arttırmıştır.

Anahtar Kelimeler: D-STATKOM, PI denetleyici, Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici, Güç Kalitesi.

ABSTRACT

The control of D-STATCOM used in reactive power compensation and connected in parallel to the distribution system is very important. In general, Proportional+ Integral (PI) controllers with fixed parameters are used for this purpose. However, it is also known that these controller structures have not the desired performance. Nowadays, intelligent controller structures are used and preferred in control of D-STATCOM. In this study, a Type-2 Fuzzy Logic Controller (T2FLC) has been designed which has a good performance under the control of conditions including uncertainties. The proposed controller structure is used to control both the DC-bus voltage and the dq axis currents of D-STATCOM. In addition, simulation studies are carried out under the same conditions and different scenarios are created. According to the results obtained from simulation studies, the proposed controller structure has greatly improved the performance of D-STATCOM and increased the durability of the system.

Keywords: D-STATCOM, PI controller, Type-2 Fuzzy Logic Controller, Power Quality.

1. Giriş

Son yıllarda, dağıtım sistemlerinde bulunan yüklerin endüktif ve kapasitif karakterde olmasından dolayı şebeke geriliminin ve akımının aynı fazda olmaması durumu ortaya çıkmaktadır. İdeal bir sitemden beklenen karakteristik ise; şebeke geriliminin ve akımının aynı fazda olması, düşük harmonik bileşenlere sahip akımların olması ve dağıtım sistemlerinin her noktasında frekans ve gerilimin istenilen değerde olmasıdır. Belirtilen bu durumların olmaması durumunda ise enerji kalitesi problemleri ortaya çıkmaktadır. Enerji kalitesinin iyileştirilmesinde reaktif güç bileşeninin denetiminin yapılması gerekmektedir. En yaygın olarak kullanılan reaktif güç kompanzasyonu ise sabit kondansatör guruplarının güç sistemine dâhil edilmesiyle gerçekleştirilmesi temeline dayanmaktadır. Fakat bu kompanzasyon işleminin cevap hızının çok düşük olması ve anahtarlamalardan meydana gelen enerji kalitesi problemleri en olumsuz sakıncalardır (Deniz ve ark., 2011; Keçecioglu ve ark., 2016; Yıldız ve ark., 2015; Maraşlıoğlu ve ark., 2017; Tekin ve ark., 2017).

Günümüzde, güç elektroniği ve mikroilemcilerdeki hızlı ilerlemelerle ve gelişmelerle birlikte dağıtım sistemlerindeki enerji kalitesini iyileştirmek için evirici temelli kompanzasyon cihazları kullanılmaya başlanmıştır. İlk olarak, "Tristör Denetimli Statik Var Kompanzator (TCSVC)" ark fırını kompanzasyonu için geliştirilmiştir. Daha sonra ise "Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) enerji kalitesi sorunları için ortaya çıkmıştır. Bu sistemlerdeki cihazlardan olan Dağıtım STATik KOMpanzator (D-STATKOM) enerji kalitesi problemleri ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, D-STATKOM harmonik filtreleme, gerilim regülasyonu ve yük kompanzasyonu gibi birçok görevi yapmaktadır. D-STATKOM'da bulunan evirici yapısı tüm sistemin en önemli kısmıdır (Kumar ve ark., 2014; Liu ve ark., 2003; Singh ve Sabha, 2013). Ayrıca, iyi bir

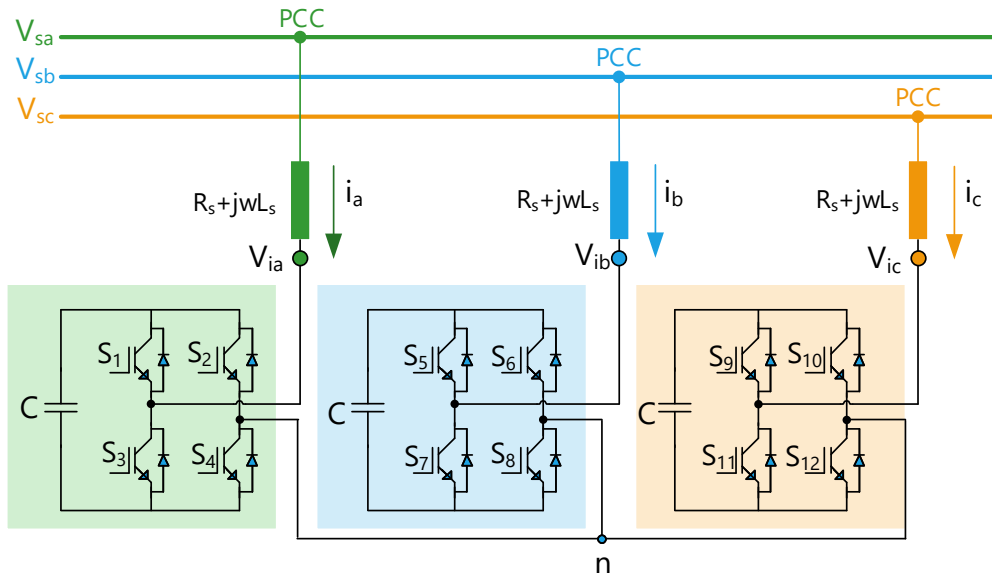
reaktif güç kompanzasyonu için D-STATKOM'un denetimi oldukça önemlidir. D-STATKOM'un denetiminde genellikle basit yapılarından dolayı Oransal+Integral (PI) denetleyiciler tercih edilmektedir. Bu denetleyicilerin kazanç parametrelerinin bulunması için ya deneme-yanılma yolu tercih edilmektedir ya da D-STATKOM'un matematiksel olarak ifade edildiği blok diyagramları kullanılmaktadır. Ayrıca, PI denetleyicilerin sabit parametrelere sahip olması, doğrusal olmayan sistemlerde düşük performansa neden olmaktadır (Blasko ve Kaura, 1997; Acikgoz ve ark., 2016; Kececioğlu ve ark., 2017).

Son yıllarda, akıllı ve hibrit denetleyici yapıları D-STATKOM'un denetiminde kullanılmaktadır. Çötel ve ark., üç seviyeli evirici tabanlı D-STATKOM için Sinirsel Bulanık Denetleyici (SBD) yapısını önermişlerdir. DA-bara geriliminin denetimi için PI denetleyici ve dq-eksen akımlarının denetiminde de SBD kullanmışlardır. Önerilen denetleyici temelli D-STATKOM'un performansını ve doğruluğunu göstermek için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Çötel ve ark., 2018). Çötel ve ark., D-STATKOM'un aktif ve reaktif güç bileşenlerinin denetimi için Bulanık-PI denetleyici önermişlerdir. Benzetim çalışmaları gerçekleştirilerek klasik PI denetleyici ile önerilen denetleyici yapısını karşılaştırmışlardır (Çötel ve ark., 2011). Bhim Singh ve ark., D-STATKOM'un DA-bara geriliminin denetimi için adaptif bulanık-PI denetleyici yapısını sunmuşlardır (Singh ve ark., 2013). Saber Bouafia ve ark., üç seviyeli ve dört bacaklı D-STATKOM için ikinci derece kayma modlu denetleyici yapısını önermişlerdir. Bu denetleyici yapısının performansını göstermek için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Bouafia ve ark., 2018). Apel Mahmud ve ark., D-STATKOM için doğrusal olmayan bir denetleyici yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem kısmi geri beslemeli bir doğrusallaştırma esasına dayanmaktadır (Apel Mahmud ve ark., 2013). Eswaran ve Kumar, Parçacık Sürücü Optimizasyonu (PSO) tabanlı PI denetleyiciyi D-STATKOM'un denetimi için tasarlamışlardır ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmişlerdir. Deneysel çalışmalarda, sabit parametrelili PI denetleyici ile PSO-PI denetleyiciyi karşılaştırmışlardır (Eswaran ve Kumar, 2017). Nagesh Geddada ve ark., D-STATKOM'un denetimi PI denetleyici yapısında paralel olarak bağlanan harmonik kompanzator regülatörünün tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar yapılmış ve önerilen yöntemin başarımı gösterilmiştir (Geddada ve ark., 2015).

Bu çalışmada, Tip-1 Bulanık Mantık Denetleyici (T1BMD) yapılarına alternatif olarak geliştirilen ve T1BMD'lerin uzantısı olarak da düşünülen Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici (T2BMD) yapısı D-STATKOM'un hem DA-bara geriliminin denetiminde hem de dq-eksen akımlarının denetiminde kullanılmıştır. Her iki denetim yapısı da denetlenecek olan sistemin herhangi bir matematiksel modeline ihtiyaç duymadığı yaygın olarak tercih edilmektedirler. Bilindiği gibi T2BMD'ler belirsizlik içeren ve parametre değişimi sık olan sistemlerin denetiminin oldukça iyi performansa sahiptir. Bu çalışmada, T2BMD'lerin bu özelliklerini göstermek için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve klasik PI denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre önerilen denetleyici yapısının performansı hakkında bilgiler sunulmuştur.

2. ÜÇ SEVİYELİ D-STATKOM'UN MATEMATİKSEL MODELİ

Üç seviyeli D-STATKOM'un matematiksel modelinin elde edilmesi sistemin denetimi için önemlidir. Şekil 1'de üç seviyeli D-STATKOM'un güç devresi verilmiştir. Bu model sayesinde D-STATKOM'un matematiksel modeli elde edilebilir. Şekil 1'de gösterilen devrenin her bir fazındaki; C, DA-bara gerilimini, L_s hat endüktansını ve R_s ise hat endüktansının iç direncini temsil etmektedir.



Şekil 1. Üç Seviyeli D-STATKOM'un Şematik Gösterimi

İdeal bir durumda D-STATKOM ile şebeke arasında aktif güç akışı olmamaktadır. Bu durumda sadece reaktif güç akışı olmaktadır. Fakat gerçek uygulamalarda ise durum çok farklıdır (Çötel ve ark., 2018; Singh ve ark., 2013).

D-STATKOM yapısında kullanılan anahtarlama elemanların bulunması, hat endüktansının iç dirence sahip olması ve DA-baradaki kondansatörlerin varlığından dolayı aktif güç kayıpları meydana gelmektedir. D-STATKOM doğru bir şekilde denetlenmediği takdirde aktif güç kayıplarının sağlanması için DA-bara kondansatörleri sayesinde gerçekleştirilecektir. Böylece DA-bara geriliminin azalması kaçınılmaz olacaktır. Bu istenilmeyen durumu ortadan kaldırmak için D-STATKOM'un temel bileşeni ile şebeke gerilimi arasında faz farkı oluşturularak aktif güç kayıpları şebekeden sağlanır (Çöteli ve ark., 2011; Çöteli ve ark., 2018). D-STATKOM tarafından çekilen aktif güç ve üretilen reaktif güce ait denklemler ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P = \frac{V_s \cdot V_i}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_s}{X} (V_s - V_i \cos \delta) \quad (2)$$

Burada, X ; hat endüktansının kaçak reaktansı, V_s şebeke gerilimini V_i çıkış gerilimini, δ ise elde edilen faz farkını ifade etmektedir. Şekil 1'den, H-köprü çevirici tabanlı D-STATKOM'un AA tarafının abc koordinatlarındaki devre denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_a + \frac{1}{L_s} (V_{sa} - V_{ia}) \quad (3)$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_b + \frac{1}{L_s} (V_{sb} - V_{ib}) \quad (4)$$

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_c + \frac{1}{L_s} (V_{sc} - V_{ic}) \quad (5)$$

Burada, V_{sabc} ve V_{iabc} şebeke ve çıkış gerilimini göstermektedir. Faz akımları ise i_{abc} ile gösterilmiştir. Üç fazlı değişkenleri dq-eksenlerdeki değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle Park dönüşüm matris sabitinin bilinmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm sabiti aşağıdaki gibi verilebilir.

$$K = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Yukarıda verilen ifadenin kullanılması ile üç fazlı değişkenler kolayca dq-eksenlerinde değerlerine dönüştürülür. Bu dönüşümden sonra aşağıdaki matematiksel ifadeler elde edilir.

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_d + \omega i_q + \frac{1}{L_s} (V_{sd} - V_{id}) \quad (7)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_q - \omega i_d + \frac{1}{L_s} (V_{sq} - V_{iq}) \quad (8)$$

Burada, V_{sd} ve V_{sq} ; şebeke geriliminin, V_{id} ve V_{iq} ise çıkış geriliminin dq-eksen bileşenleridir. Ayrıca, V_{id} ve V_{iq} değerleri aşağıdaki denklemlerle gösterilebilir.

$$V_{id} = M_a V_{da} \cos \delta \quad (9)$$

$$V_{iq} = M_a V_{da} \sin \delta \quad (10)$$

Burada, M_a modülsayon indeksini ve V_{da} ise DA-bara gerilimini ifade eder. DA-bara akımı ise aşağıdaki gibidir.

$$i_{da} = \frac{3}{2} M_a (i_d \cos \delta - i_q \sin \delta) \quad (11)$$

Aşağıdaki denklem ise D-STATKOM'un DA tarafındaki dinamik modeli elde edilir.

$$\frac{dV_{da}}{dt} = \frac{3M_a}{2C} (i_d \cos \delta - i_q \sin \delta) \quad (12)$$

3. DENETLEYİCİ TASARIMI

3.1.PI Denetleyici Tasarımı

Bu çalışmada, D-STATKOM'un DA-bara geriliminin ve dq-eksen akımlarının denetimi için PI ve T2BMD kullanılmıştır. PI denetleyicilerin kazanç parametrelerinin bulunması için D-STATKOM'un matematiksel modelini ifade eden indirgenmiş blok diyagramlarına gerek duyulmaktadır (Blasko ve Kaura, 1997; Acikgoz ve ark., 2016). Bunun içinde aşağıdaki indirgenmiş blok diyagramları elde edilmiştir. dq-eksen akımlarının denetimi için oluşturulan indirgenmiş blok diyagramından faydalanılarak sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$H_{dq} = \frac{1}{s^2 \frac{T_{RL} T_{ek}}{K_p K_{DGM} K_{RL}} + s \frac{T_{RL}}{K_p K_{DGM} K_{RL}} + 1} \quad (13)$$

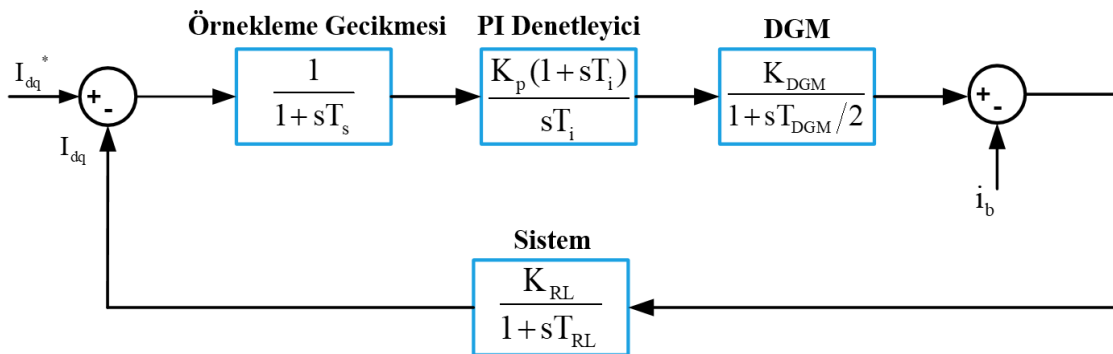
olarak elde edilir. %5'lik aşım sağlamak için sönüm oranı (ζ) = $\sqrt{2}/2$ olarak seçilirse;

$$\zeta^2 = \frac{T_{RL}}{4K_p K_{DGM} K_{RL}} \quad (14)$$

olarak bulunur. Böylece, PI denetleyicinin oransal kazancı aşağıdaki denklem ile kolayca hesaplanabilir.

$$K_p = \frac{T_{RL}}{2T_{ek} K_{DGM} K_{RL}} \quad (15)$$

Burada, T_s ; örnekleme ve filtre gecikmesi, K_p ; PI denetleyici oransal kazancı, T_i ; PI denetleyici integral zaman sabiti, T_{DGM} ; DGM bloğunun zaman sabiti, K_{DGM} ; doğrultucu kazancı, K_{RL} ; sistem kazancı ve T_{RL} ; sistemin zaman sabitidir.



Şekil 2. dq-Eksen Akımlarının Denetimi için Oluşturulan İndirgenmiş Blok Diyagramı

dq-eksen akımlarını için oluşturulan blok diyagramından ilk olarak açık çevrim transfer fonksiyonu;

$$H_{a\zeta} = \frac{k_u (1 + sT_{ui})}{sT_{ui} (1 + sT_{eu}) sC_{da1}} \quad (16)$$

olarak elde edilir. Simetrik optimum yöntemine göre elde edilen açık çevrim transfer fonksiyonu köşe frekansında (ω_c) yaklaşık olarak simetriktir. ω_c ve faz payı (ϕ) arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$T_{eu} = T_{gu} + 2T_{ek} \text{ ve } a = \frac{1 + \cos \phi}{\sin \phi} \quad (17)$$

$$a = \sqrt{\frac{T_u}{T_{eku}}}, \quad a > 1 \quad (18)$$

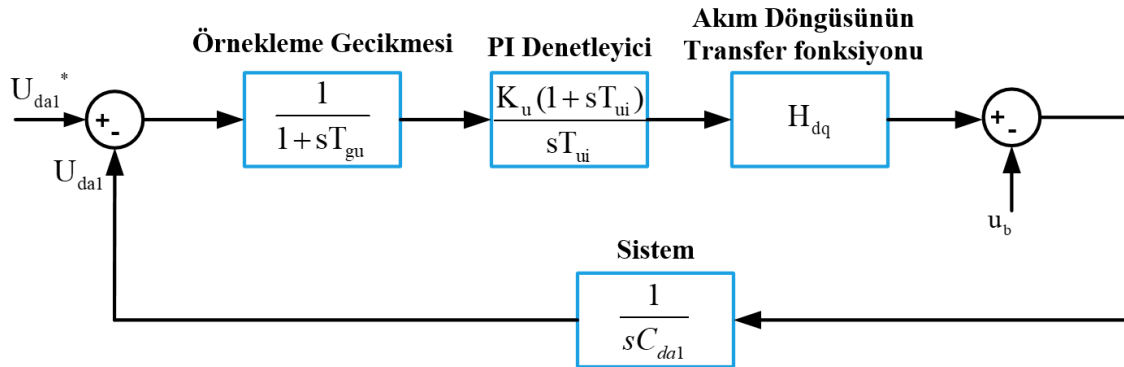
olarak kabul edilmiştir. DA-bara gerilimin denetimindeki PI denetleyicinin oransal kazancı aşağıdaki denklemle elde edilebilir.

$$K_u = \frac{C_{da}}{aT_{eku}} \quad (19)$$

Verilen faz payı, zaman sabiti (T_u) ve PI denetleyicinin oransal kazancı (K_u) değerlerine göre kapalı çevrim transfer fonksiyonu ise aşağıdaki gibidir (Blasko ve Kaura, 1997; Sekkeli ve ark., 2015).

$$H_{da} = \frac{(1 + sT_u)}{(aT_{eu}s + 1)(a^2T_{eu}^2s^2 + (a-1)aT_{eu}s + 1)} \quad (20)$$

Burada, T_{gu} ; örnekleme ve filtre gecikmesi, K_u ; PI denetleyicinin oransal kazancı, T_{ui} ; PI denetleyici integral zaman sabiti, H_{dq} ; akım döngüsünden elde edilen transfer fonksiyonun ve C_{da} ; DA-bara kondansatörünün değeridir. H_{da} transfer fonksiyonunda, $a=2.4$ olarak alınmıştır.



Şekil 3. DA-Bara Geriliminin Denetimi için Oluşturulan İndirgenmiş Blok Diyagramı

3.2. T2BMD Tasarımı

BMD yapılarının en önemli özelliklerinin biride denetlenecek olan sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymamalarıdır. Bu nedenle denetleyici yapısını tasarlayacak olan uzman kişinin bilgi birikiminin oldukça iyi olması gerekmektedir. T2BMD, T1BMD'nin bir uzantısı olarak düşünülebilir (Rahib Hidayat ve Kaynak, 2010; Kumbasar ve ark. 2012; Acikgoz ve ark., 2017b). Bu nedenle, her iki denetleyici yapısı birbirine benzerdir.

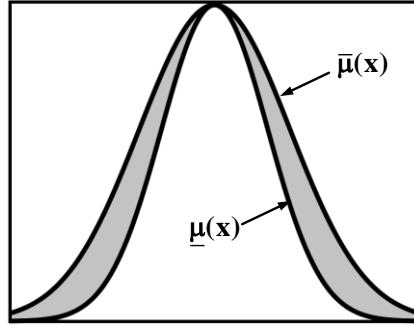
Tip-2 bulanık kümesi \tilde{A} aşağıdaki gibi karakterize edilir.

$$\tilde{A} = \left\{ ((x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u)) / \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1] \right\} \quad (21)$$

Burada; $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$. \tilde{A} kümesi aşağıdaki ifadeyle de gösterilebilir.

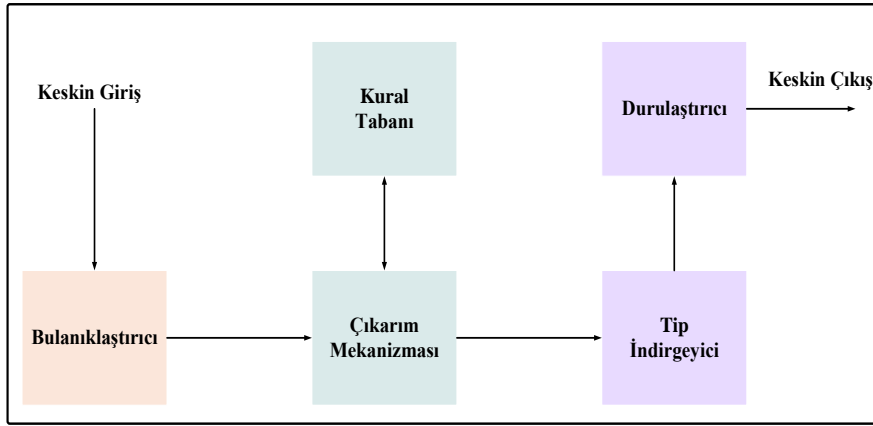
$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u), \quad J_x \subseteq [0, 1] \quad (22)$$

Burada; $\int \int$ tüm kabul edilebilir x ve u giriş değişkenlerinin üzerindeki keşişimi göstermektedir. $J_x \subseteq [0, 1]$, x 'in birincil üyeliğini temsil eder. $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$, ikincil küme olarak bilinen bir tip-1 bulanık kümedir. Bu nedenle, bir tip-2 üyelik derecesi $[0, 1]$ arasında herhangi bir alt kümede olabilir. Birincil üyelik olasılıklarını tanımlayan ikincil üyelik vardır (Acikgoz ve ark., 2017a). Belirsizlik, belirsizlik izi (FOU) olarak adlandırılan bir bölge ile temsil edilir. Eğer, $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1, \forall u \in J_x \in [0, 1]$ ifadesine göre aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu elde edilir. Tip-2 bir üyelik fonksiyonu üst $\bar{\mu}_A$ ve alt $\underline{\mu}_A$ üyelik fonksiyonları ile tanımlıdır ve şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Tip-2 Gauss Üyelik Fonksiyonu

Bir T2BMD, T1BMD'deki gibi "Eğer-O Halde" kuralları ile karakterize edilir. T1BMD'ye benzer şekilde T2BMD, bulanıklaştırıcı, kurak tabanı, bulanık çıkarım mekanizması ve çıkış işlemcisinden oluşmaktadır ve T2BMD'nin içyapısı Şekil 5'de verilmiştir. Çıkış işlemcisinde ise tip indirgeyici ve durulaştırıcı bulunmaktadır. Denetleyici çıkışı elde etmek için ilk önce girişler belirlenmektedir. Daha sonra bulanıklaştırıcı sayesinde bu girişler tip-2 bulanık kümelere dönüştürülürler. Bulanık çıkarımda bulunan tip indirgeyici ile tip-2 bulanık kümelere tekrardan tip-1 bulanık kümelere dönüştürülür. Elde edilen tüm kümeler ise durulaştırıcı sayesinde keskin değerlere ve çıkışlara dönüştürülürler.



Şekil 5. T2BMD'nin İçyapısı

Bir tip-2 bulanık kümesi için genel olarak aşağıdaki kural yazılabilir.

$$R^l = \text{Eğer } x_1 \tilde{A}_1^l \text{ ise ve } x_p \tilde{A}_p^l, \text{ o halde } y, \tilde{G}^l. \quad l=1, \dots, M \quad (23)$$

Burada; G^l ifadesi çıkış tip-2 bulanık dilsel terimlerini ifade eder. Bu çalışmada, önerilen denetleyici yapısı için öncül ve sonuç önermeleri için Üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Her bir kuralın ateşleme kuvveti;

$$f(x) = [\underline{f}^l, \bar{f}^l] \quad (24)$$

$$\underline{f}^l(x) = \underline{\mu}_{\tilde{A}_1^l}(x_1) * \underline{\mu}_{\tilde{A}_p^l}(x_p) \quad (25)$$

$$\bar{f}^l(x) = \bar{\mu}_{A_l'}(x_l) * \bar{\mu}_{A_p'}(x_p) \quad (26)$$

olarak ifade edilir. Tip indirgeyici çıkışından ise y_r ve y_l ifadeleri elde edilir. Bu değerler ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

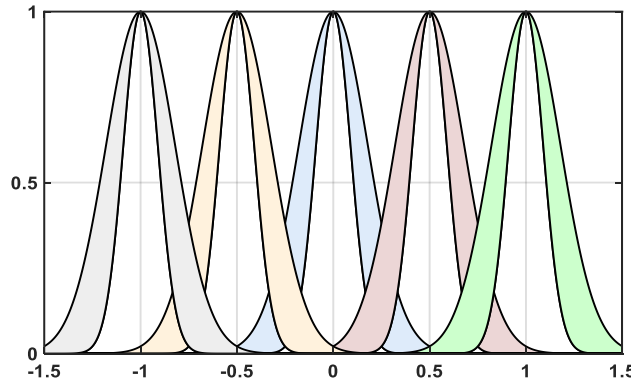
$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^M f_l^i y_l^i}{\sum_{i=1}^M f_l^i} \quad (27)$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^M f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^M f_r^i} \quad (28)$$

Sonuç olarak çıkış keskin değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$y = \frac{y_r + y_l}{2} \quad (29)$$

Bu çalışmada tasarlanan T2BMD'nin iki girişi ve tek çıkışı bulunmaktadır. Girişler referans DA-bara gerilimi ile ölçülen DA-bara gerilimi arasındaki hata ve hatadaki değişimdir. Her bir giriş için Gauss üyelik fonksiyonu seçilmiştir ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Gaussian üyelik fonksiyonu [-1.5,1.5] arasında belirlenmiştir. Benzetim çalışmalarında tasarlanan Matlab/Simulink modelde her bir girişi ve çıkışı ölçeklendirmek için kazanç değerleri bulunmaktadır. Böylece, üyelik fonksiyonlarının aralıkları kolayca değiştirilebilmektedir. Her bir giriş ve çıkış için kullanılan üçgen üyelik fonksiyonunda kullanılan dilsel değişkenler ise; Negatif Büyük (NB), Pozitif Büyük (PB), Sıfır (S), Negatif Küçük (NK), Pozitif Küçük (PK) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu dilsel değişkenlerden oluşturulan 5X5'lik kurallar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6. T2BMD'nin Yapısında Kullanılan Gaussian Üyelik Fonksiyonu

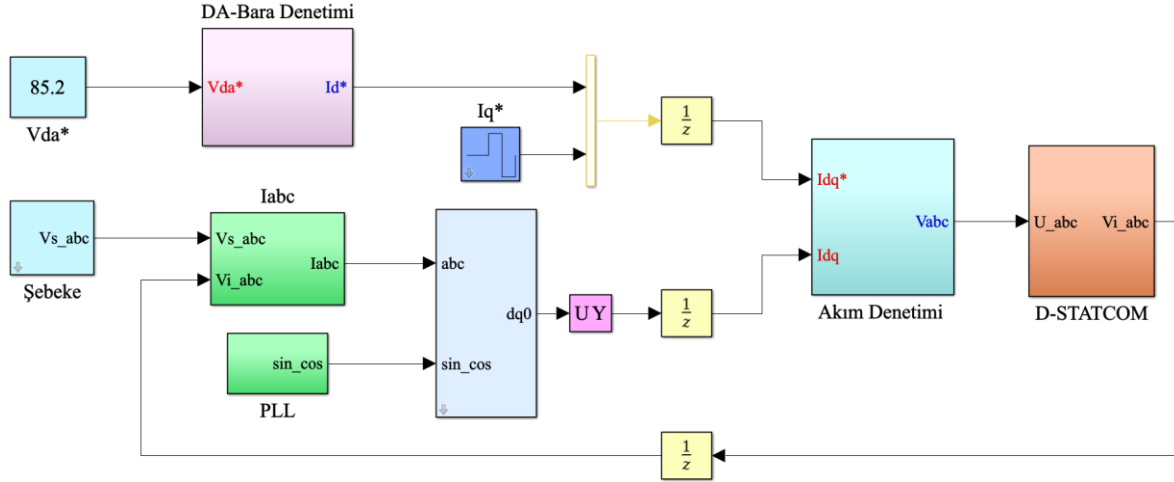
Tablo 1. 5x5 Kural Tablosu

de e	NB	NS	S	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NK	S
NK	NB	NK	NK	S	PK
S	NB	NK	S	PK	PB
PK	NS	S	PK	PK	PB
PB	S	PK	PB	PB	PB

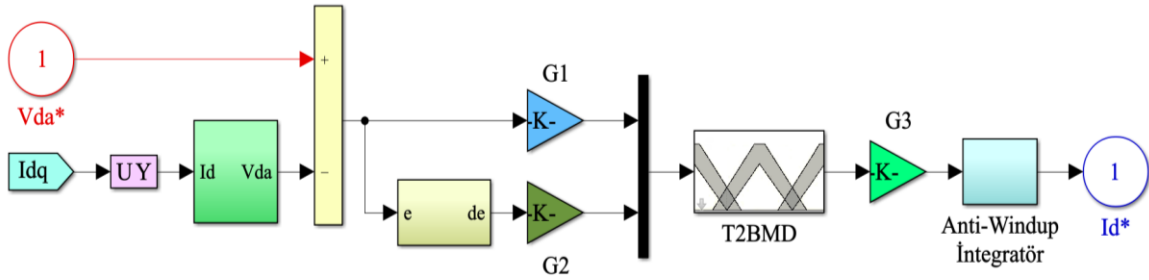
4. BENZETİM ÇALIŞMASI

Üç seviyeli D-STATKOM'un benzetim çalışmasını gerçekleştirmek için Matlab/Simulink ortamında tasarlanan model Şekil 7'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan Matlab/Simulink modeli; DA-bara denetimi, akım denetimi, faz kilitleme döngüsü (PLL) ve D-STATKOM bloklarından oluşmaktadır. DA-bara denetimi bloğunda referans DA-bara gerilimi ile ölçülen DA-bara gerilimi karşılaştırılarak aradaki hata denetleyici yapısına uygulanmaktadır. Bu yapı ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Denetleyici çıkışına anti-windup integratör bağlanarak sistemin kalıcı durum hatasının oluşması engellenmiştir. Şekil 9'da gösterilen akım denetim bloğunda ise dq-eksen akımları ile bu akımların referans değerleri karşılaştırılmış ve T2BMD'ye giriş olarak uygulanmıştır. Belirlenen q-sekseni akımının değerine göre de denetleyicinin çıkışından D-STATKOM'un bu akım

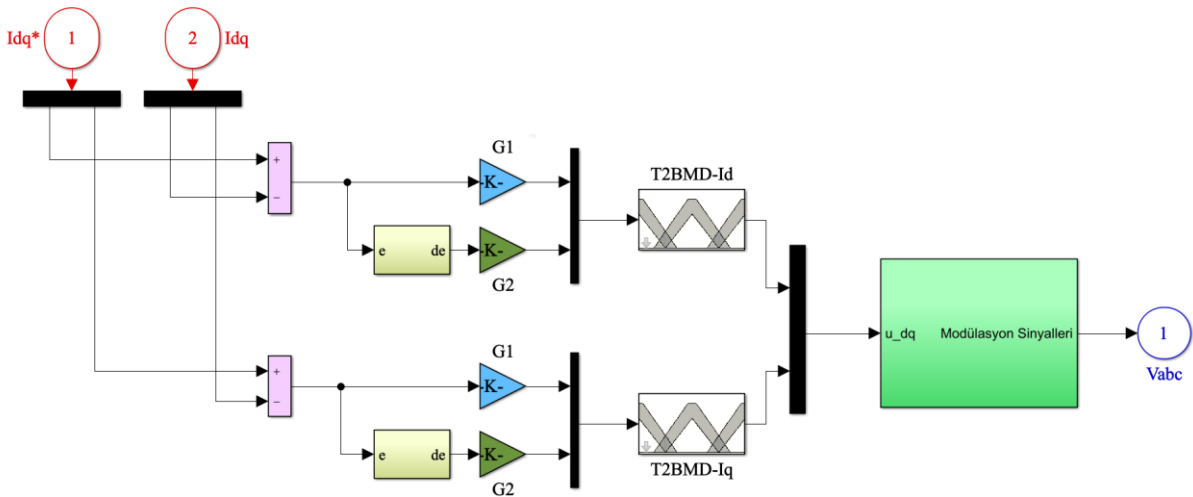
bileşenini üretebilmesi için şebeke ile eviricinin çıkış geriliminin temel bileşeni arasındaki faz farkı elde edilir. Bu faz farkı sayesinde ise istenilen DA-bara gerilim değerinin elde edilmesi sağlanır. Ayrıca, şebeke ile üç-seviyeli D-STATKOM'un eşzamanlı çalışması için faz kilitleme döngüsü kullanılmıştır.



Şekil 7. Üç Seviyeli D-STATKOM'un Matlab/Simulink Modeli



Şekil 8. DA-bara Denetim Bloğunun İçyapısı



Şekil 9. Akım Denetim Bloğunun İçyapısı

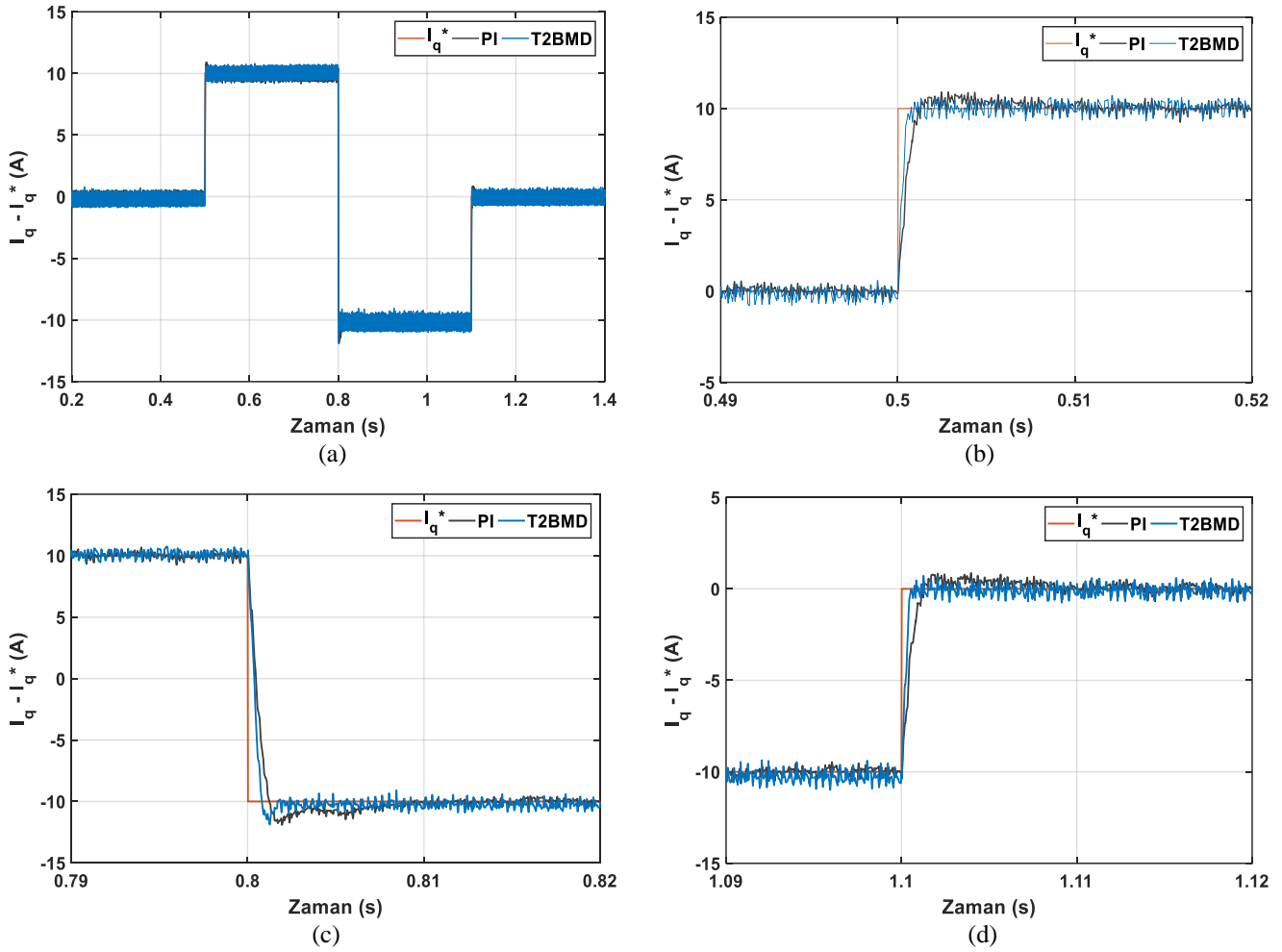
T2BMD ile denetlenen üç seviyeli D-STATKOM'un performansını değerlendirmek için üç tane senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolara ait bilgiler Tablo 2'de verilmiştir. Referans q-ekseni (I_q^*) akım bileşenin değiştirilmesiyle oluşturulan senaryolardan elde edilen benzetim çalışması sonuçları Şekil 10-12'de verilmiştir.

İlk senaryoda, D-STATKOM'un bekleme durumundan kapasitif çalışmaya geçmesindeki performansı incelenmiştir. D-STATKOM'un bekleme durumundaki DA-bara gerilimi 85.2 V olarak belirlenmiştir. Bekleme durumu sağlandıktan sonra 0.5-0.8 saniyeleri arasında referans q-ekseni akımı 0 A'dan 10 A'ya artırılarak ilk senaryo gerçekleştirilmiştir. Referans q-ekseni

akımı ile T2BMD ve PI denetleyicilerden elde edilen q-ekseni akımlarının değişimi Şekil 10 (b)'de gösterilmiştir. PI denetleyici referans değeri 8.4 ms sonra yakalamış ve % 8.2'lik bir aşım yapmıştır. T2BMD ise 2.1 ms sonra referans değeri yakalamış ve aşım yapmamıştır. Ayrıca, bu durum süresince DA-bara gerilimi ve aktif güç bileşeni olan d-ekseni akımlarının değişimi Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Önerilen denetleyici yapısıyla denetlenen D-STATKOM'un hem DA-bara gerilimi hem de d-ekseni akımı bu durumdan etkilenmemiştir. PI denetleyicinin ilk senaryodaki DA-bara ve d-ekseni akımı cevaplarında aşımalar meydana gelmiş ve belirli süreler sonrasında referans değerlerini yakalamıştır.

Tablo 2. Senaryo Bilgileri

	Senaryolar	Zaman Aralığı
1.Senaryo	Başlangıç-Kapasitif	0.5-0.8 s
2.Senaryo	Kapasitif-Endüktif	0.8-1.1 s
3.Senaryo	Endüktif-Başlangıç	1.1-1.4 s

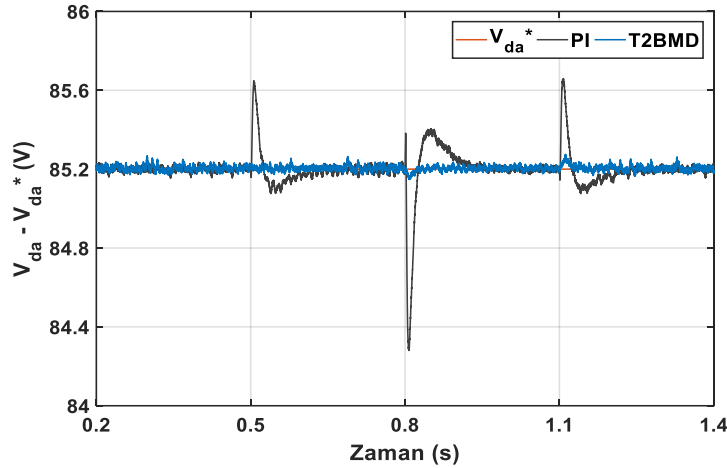


Şekil 10. Endüktif ve Kapasitif Çalışma Durumlarındaki I_q ile I_q^* Akımlarının Değişimi

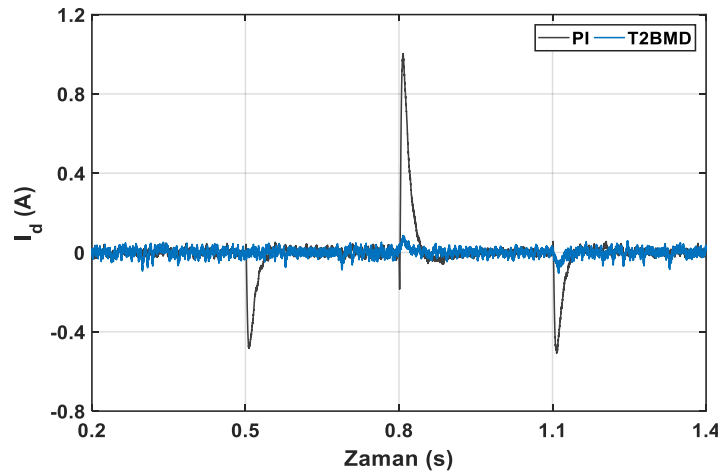
İkinci senaryoda ise D-STATKOM'un kapasitif çalışma durumundan endüktif çalışma durumuna geçişindeki performansı gözlemlenmiştir. Bu senaryoyu gerçekleştirmek için referans q-ekseni akımı 10 A'dan -10 A'ya 0.8 ile 1.1 saniyeleri arasında değiştirilmiştir. Önerilen denetleyici yapısı ile sabit parametrelili PI denetleyici aynı şartlar altında test edilmiş ve bu denetleyicilerin performansları karşılaştırılmıştır. Referans q-ekseni akımı ile önerilen denetleyici yapısından ve PI denetleyicilerden elde edilen q-ekseni akımlarının değişimi Şekil 10 (c)'de verilmiştir.

T2BMD referans q-ekseni akımını 4.2 ms sonra yakalarken PI denetleyici yaklaşık 10 ms sonra yakalamıştır. Ayrıca Şekil 11'e dikkat edilirse PI denetleyici % 1.17'lik bir aşım yapmış ve 150 ms sonra referans DA-bara gerilimini yakalamıştır. T2BMD ise % 0.061'lik aşım yaparak yaklaşık 23 ms sonra referansı takip etmiştir. I_d akımının bu senaryo süresince değişimi ise Şekil 12'de verilmiştir. Bu senaryodan, hızlı kompanzasyon akımı ihtiyacı olan yüklerin önerilen denetleyici yapısına sahip D-STATKOM ile istenilen reaktif akımı çok hızlı bir şekilde sağlayacağı sonucu çıkarılabilir.

Üçüncü senaryoda ise endüktif çalışma durumundan bekleme durumuna geçişteki D-STATKOM'dan elde edilen cevaplar değerlendirilmiştir. Bu senaryonun elde edilmesi için referans q-ekseni akımı -10 A 'dan 0 A 'ya 1.1 ile 1.4 saniyeleri arasında değiştirilmiştir. T2BMD ve PI denetleyicilerden elde edilen q-ekseni akımlarının değişimi Şekil 10 (d)'de verilmiştir. T2BMD ile denetlenen D-STATKOM'un q-ekseni cevabı 1 ms sonra referans değerini yakalamış ve aşım yapmamıştır. PI denetleyici ise 10 ms sonra referans q-ekseni akımını yakalamıştır. Yine Şekil 11 ve 12'de verilen DA-bara ile I_d akımının değişiminde önerilen denetleyici yapısı PI denetleyiciye karşı; aşım, yerleşme ve yükselme zamanları bakımında üstünlük sağlamıştır. Böylece sistemin hem dayanıklılığı iyileştirilmiş hem de kararlılığı arttırılmıştır.



Şekil 11. Endüktif ve Kapasitif Çalışma Durumlarındaki DA-Bara Geriliminin Değişimi



Şekil 12. Endüktif ve Kapasitif Çalışma Durumlarındaki I_d Akımının Değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, D-STATKOM'un DA-bara geriliminin ve dq-eksen akımlarının denetimi için T2BMD yapısı önerilmiştir. Önerilen denetleyicinin performansını incelemek için Matlab/Simulink ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları için üç farklı senaryo düşünülmüştür. Bu senaryolarda PI denetleyici ile T2BMD aynı şartlar altında karşılaştırılmıştır. İlk senaryoda başlangıç durumundan kapasitif çalışmaya, ikinci senaryoda kapasitif çalışmadan endüktif çalışmaya ve son senaryoda ise endüktif çalışmadan başlangıç durumuna geçişteki denetleyici performanslarının değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, önerilen denetleyici yapısının tüm senaryolarda PI denetleyiciden aşım, yerleşme ve yükselme zamanları bakımından daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, T2BMD ile D-STATKOM'un kararlılığını da iyileştirdiği söylenebilir.

6. KAYNAKLAR

Acikgoz, H., Kececioğlu, O.F., Gani, A., Yıldız, C., Sekkeli, M. (2016). Improved control configuration of PWM rectifiers based on neuro-fuzzy controller, SpringerPlus, 5, 1-19.

- Acikgoz, H., Kececioglu, O.F., Gani, A., Tekin, M., Sekkeli, M. (2017a). Robust Control of Shunt Active Power Filter Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller for Power Quality Improvement, *Technical Gazette*, 24, 363-368.
- Acikgoz, H., Kececioglu, O.F., Karadol, I., Gani, A., Sekkeli M. (2017b). Adaptive Control of Solid State Transformer Using Type-2 Fuzzy Neural System, *Studies in Informatics and Control*, ISSN 1220-1766, 2017, vol. 26(2), pp. 171-182, 2017.doi:10.24846/v26i2y201705.
- Blasko, V., Kaura, V. (1997). A New mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter, *IEEE Power Electronics*, 12, 116-123.
- Bouafia, S., Benaissa, A., Barkat, S., Bouzidi, M. (2018). Second order sliding mode control of three-level four-leg DSTATCOM based on instantaneous symmetrical components theory, *Energy Systems*, 9, 79–111.
- Coteli, R., Dandil, B., Acikgoz, H., Kececioglu, O.F., Gani A. (2018). D-STATKOM'un DA-Hat Geriliminin Model Referans Uyarlamalı Denetimi", *International Congress on Engineering and Architecture (Enar– 2018) Alanya/Turkey*.
- Çöteli, R., Açıkgöz, H., Dandil, B., Tuncer, S. (2018). Real-time implementation of three-level inverter-based D-STATCOM using neuro-fuzzy controller, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26, 2088-2103.
- Çöteli, R., Dandil, B., Ata, F. (2011). Fuzzy-PI current controlled D-STATCOM, *Gazi University Journal of Science*, 24, 91-99.
- Deniz, E., Çöteli, R., Dandil, B., Tuncer, S. (2011). Design and implementation of three level H-bridge inverter based DSTATCOM, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26, 289-298.
- Eswaran, T., ve Suresh Kumar, V. (2017). Particle swarm optimization (PSO)-based tuning technique for PI controller for management of a distributed static synchronous compensator (DSTATCOM) for improved dynamic response and power quality, *Journal of Applied Research and Technology*, 15, 173–189.
- Kececioglu, O.F., Acikgoz, H., Sekkeli, M. (2016). Advanced configuration of hybrid passive filter for reactive power and harmonic compensation, *SpringerPlus*, 5, 1-20.
- Kececioglu, O.F., Acikgoz, H., Yildiz, C., Gani, A., Sekkeli, M. (2017). Power Quality Improvement Using Hybrid Passive Filter Configuration for Wind Energy Systems, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 12 (1), 206-217.
- Kumar, P., Kumar, N., Akella, A.K. (2014). A simulation based case study for control of D-STATCOM. *ISA Transactions*, 53, 767–775.
- Kumbasar, T., Eksin I., Ibrahim, E., Guzelkaya, M., Yesil, E. (2012). Type-2 fuzzy model based controller design for neutralization processes, *ISA Transactions*, 51, 277-287.
- Liu, F., Mei, S., Lu, Q., Ni, Y., Wu, F.F., Yokoyama, A. (2003). The nonlinear internal control of STATCOM: theory and application, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25, 421-430.
- Mahmud, M.A., Pota, H.R., Hossain, M.J. (2013). Nonlinear DSTATCOM controller design for distribution network with distributed generation to enhance voltage stability, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 974–979.
- Marashloglu, B., Gani, A., Kececioglu, O.F., Acikgoz, H., Sekkeli M. (2017). Investigation Of Energy Quality In Open-End Yarn Facilities, *2nd International Energy and Engineering Conference*, 2017.
- Nagesh, G., Mahesh K.M., Manoj Kumar, M.V. (2015). SRF based current controller using PI and HC regulators for DSTATCOM with SPWM switching, *Electrical Power and Energy Systems*, 67, 87–100.
- Rahib Hidayat, A., Kaynak, O. (2010). Type 2 fuzzy neural structure for identification and control of time-varying plants, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, 4147-4159.
- Sekkeli, M., Acikgoz, H., Kececioglu, O.F., Gani, A. (2015). Modeling and analysis of three-phase space vector pulse width modulation based rectifiers using fuzzy-PI Controller, *Int Refereed J Eng Sci*, 3(8), 75-92.

Singh, B., Sabha, R.A. (2013). Adaptive theory-based improved linear sinusoidal tracer control algorithm for DSTATCOM, *IEEE Transactions On Power Electronics*, 28, 3768-3778.

Singh, B., Saha, R., Chandra, A., Al-Haddad, K. (2008). Static synchronous compensators (STATCOM): a review. *IET Power Electronics*, 2, 297-324.

Tekin, M., Gani, A., Açıkgöz, H., Keçecioglu, Ö.F., Şekkeli M. (2016). Power Quality Analysis of A Campus Field: Case Study for Avşar Campus of Kahramanmaraş Sütçü İmam University”, 4th International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science, 2016.

Yıldız, C., Keçecioglu, Ö.F., Açıkgöz, H., Gani, A., Şekkeli M. (2015). Power quality measurement and evaluation of a wind farm connected to distribution grid, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2370-2375.