



Güç sistemlerindeki optimum otomatik gerilim regülasyonu için çoklu amaç fonksiyonunun belirlenmesi

Elif KILIÇ*

Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tunceli
elifkilig@munzur.edu.tr ORCID: 0000-0002-3237-6286

Mahmut Temel ÖZDEMİR

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ
temelozdemir@gmail.com ORCID: 0000-0002-5795-2550

Geliş: 16.02.2018, Kabul Tarihi: 15.05.2018

Öz

Elektrik güç sistemlerinde sistem gerilimi, güç kalitesine etki eden en önemli parametrelerden biri olup çok kritik bir öneme sahiptir. Güç sistemlerinde gerilim kontrolü otomatik gerilim regülatörleri (OGR) ile yapılmaktadır. Otomatik gerilim regülatörleri, sistem geriliminin sabit tutulmasını sağlarlar. Bir OGR sisteminde PID denetleyici parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi son derece önemlidir. Bu parametrelerin en iyilerini bulma yöntemlerinden birisi de optimizasyon tekniklerini kullanmaktır. Amaç fonksiyonu, optimizasyon algoritmalarının doğru yönlendirilmesi için kritik öneme sahiptir. Optimizasyon tekniklerinde kullanılan amaç fonksiyonları genellikle ITSE, ITAE, ISE ve IAE'dir. Ancak en doğru sonuca ulaşmak için amaç fonksiyonunun sisteme, probleme ve kısıtlara göre değişiklik göstermesi gerekmektedir. Dolayısı ile optimizasyonun birden fazla amaç gözetilerek yapılması ihtiyacı ortaya çıkar. Kısıtlı bir süre içerisinde otomatik gerilim regülatörleri için birden fazla amaç gözetilerek en iyi amaç fonksiyonunun elde edilmesi, bir çok amaç fonksiyonlu optimizasyon problemi oluşturur. Bu bağlamda yapılan bu çalışmada, bir OGR sisteminde optimal PID kazançlarının belirlenmesi için en iyi amaç fonksiyonunu bulma amaçlanmıştır. Birden fazla amacı karşılamak amacıyla ortaya çıkan çok amaç fonksiyonlu optimizasyon problemi, bu çalışma kapsamında belirlenen en uygun skalarizasyon tekniği ile birden fazla tek amaç fonksiyonlu optimizasyon problemine indirgenmiş, indirgenen her bir problem ayrı ayrı eş zamanlı olarak çözülmüştür. Çalışmada optimizasyon yöntemi olarak literatürde yaygın olarak bilinen PSO kullanılmıştır. Belirlenen polinomal amaç fonksiyonunun literatürde yaygın olarak kullanılan 4 amaç fonksiyonuna göre çok daha iyi sonuçlar yakaladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Otomatik Gerilim Regülatörü; Çok Amaç Fonksiyonlu Optimizasyon; Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Elektrik üretim merkezlerinden tüketim merkezlerine elektrik enerji akışını sağlayan sistemlerin bütününe enterkonnekte sistem denir. Bu enerji akışı talebe göre sürekli ve kaliteli bir şekilde sağlanmalıdır. Talepteki reaktif güç değişimi üretim merkezindeki generatörün terminal geriliminde değişime neden olmaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için terminal gerilimini nominal değerinde tutacak generatör uyarım kontrolü ya da otomatik gerilim regülatörü (OGR) sistemleri kullanılarak sistem gerilimi kontrol edilmelidir. Uygun şekilde kontrol edilemez ise durum sistemin çökmesi ile sonuçlanabilir (Özdemir vd., 2015). Bu da bir güç sisteminin yaşayabileceği en kötü olaylardan biridir.

OGR'nin temel görevi yükte normal, küçük ve yavaş değişimler olduğu zaman uyarım akımını kontrol ederek generatör uç geriliminin ve reaktif gücün belirlenen değerlerde sabit kalmasını sağlamaktır (Gozde ve Taplamacioglu, 2011). Bir güç sisteminde nominal gerilim seviyesinin sabitliğini ve kararlılığını sağlamak, güç sisteminin ana kontrol problemlerinden biridir çünkü bu güç şebekesine bağlı olan tüm cihazlar belirli bir gerilim seviyesi için tasarlanmıştır (Yegireddy ve Panda, 2014). Bu elaman, güç sistemi için kritik öneme sahip bir elamandır bu nedenle uç gerilimindeki değişim ne kadar küçük olursa olsun iyi algılamalı ve oransal kontrol yapısı ile bu değerle orantılı bir geri besleme işareti üretmelidir (Kundur, 1994). OGR, normal çalışma şartlarında çeşitli yük seviyelerinde generatörün sabit terminal gerilimini korumak için senkron generatör ile birlikte kullanılır (Kundur, 1994).

Uygulamada kullanılan pek çok kontrol yöntemi vardır (Erkol, 2017). Bunlardan en yaygın olarak bilinen ve kullanılan kontrol yöntemlerinin başında PID gelmektedir (Panda vd., 2004; Çoşkun ve Terzioğlu, 2007; Obika ve Yamamoto, 2005). PID parametrelerinin ayarlanmasında kullanılan klasik yöntem Ziegler-Nichols yöntemidir (Ziegler ve Nichols, 1993; Visioli, 2001; Tutkun ve Maden, 2010; Crnosija vd., 2006; Yun Li vd., 2006). Fakat bu

yöntemin, kullanılan kontrol sistemi için en büyük kazanç parametresinin belirlenmesi veya sabit osilasyon periyodunun bulunması gibi bazı zorlukları olduğundan PID parametrelerinin belirlenmesi için daha hızlı ve kolay yöntemler geliştirilmiştir (Montiel vd., 2007; Tutkun ve Maden, 2010). Son yıllarda PID Denetleyicinin optimal parametrelerini belirlemek amacıyla literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir (Shou-Rong Qi vd., y.y.; Rubaai ve Young, 2011). Bu yöntemler içerisinde gradyant tabanlı olarak bilinen klasik optimizasyon yöntemleri çoğunlukla yetersiz kalmaktadır (Akça, 2015). Bunun dışında birçok sezgisel (heuristic) yöntem kullanılmaktadır. Bu sınıftaki en yaygın yöntemler; Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Genetik Algoritma, Karınca Kolonisi Optimizasyonu, Diferansiyel Gelişim Algoritması'dır (Marler ve Arora, 2004; Akyol ve Alataş, 2012). Genetik algoritma (GA) ilk defa Holland (1975), Goldberg (1989) ve Michalewicz (1992)' in eserlerinde ortaya konulmuştur ve zamanla geliştirilerek farklı alanlarda başarıyla kullanılmaktadır (Keskintürk, 2006). Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA), Price ve Storn tarafından 1995 yılında geliştirilmiş olup, özellikle sürekli verilerin mevcut olduğu problemlerde verimli sonuçlar verebilen popülasyon temelli sezgisel optimizasyon yöntemidir (Mayer vd., 2005; Storn ve Price, 1995). Karınca Kolonisi Optimizasyonu ilk defa Dorigo ve arkadaşları tarafından yapılan, gerçek karınca koloni davranışlarının matematiksel modellerine dayanan bir algoritmadır (Dorigo vd., 1991). Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) 1995 yılında J. Kennedy ve R. C. Eberhart tarafından geliştirilen modern sezgisel algoritmalarından biridir (Kennedy ve Eberhart, 1995; Marini ve Walczak, 2015). Kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek oluşturulmuş bir algoritmadır (Coello Coello ve Reyes-Sierra, 2006). PSO tekniği, diğer stokastik yöntemlerden (Eberhart ve Shi, 1998; Yoshida vd., 2000) daha kısa hesap süresi ve istikrarlı yakınsama karakteristiği ile yüksek kaliteli bir çözüm üretebilir. PSO popülasyon tabanlı olasılıksal bir optimizasyon yöntemi olup çok parametrelili ve çok değişkenli optimizasyon

problemlerine çözümler üretmek için kullanılmaktadır (Alataş, 2007). Çoğu problemde olası çözümlerden yalnızca birini seçme zorunluluğu her zaman gerçekçi ve doğru olmaz (Joro vd., 1998). Dolayısı ile çok amaçlılığın söz konusu olduğu karar problemlerinde birden fazla amacın eşzamanlı gerçekleşmesinin düşünüldüğü optimizasyon yöntemi, çok amaç fonksiyonlu optimizasyon yöntemidir (Marler ve Arora, 2004).

Bir OGR sisteminde PID denetleyici parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi son derece önemlidir. OGR sisteminde tek bir amaca bağlı olarak gerçekleştirilen optimizasyonlarda sistemin birim basamak cevabının artışında maksimum verim yakalanamamaktadır. Dolayısı ile otomatik gerilim regülatörlerinin görevlerini verimli bir şekilde yapabilmeleri için birden fazla amaç gözetilerek optimizasyon yapılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Böylece problem çok amaç fonksiyonlu optimizasyon problemine dönüşmektedir. Çok amaç fonksiyonlu optimizasyon (ÇAFO) problemleri'nde birden fazla amaç önem sırasına göre çözüme etki eder. Çözüm kümesi, mümkün olduğu kadar bütün amaçları karşılamaya yönelik oluşturulmuş çözümleri kapsar. Nihai amaç ise kullanıcının tercihi doğrultusunda çözüm kümesi içerisinde en optimum çözümün seçilip kullanılmasıdır (Akça, 2015). Birden fazla amacı karşılamak amacıyla ortaya çıkan ÇAFO problemi, bu çalışma kapsamında belirlenen en uygun skalarizasyon tekniği ile birden fazla tek amaç fonksiyonlu optimizasyon problemine indirgenmiş, indirgenen her bir problem ayrı ayrı eş zamanlı olarak çözülmüştür. Tek amaç fonksiyonlu optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan bir çok yöntem ve algoritma vardır. Yapılan bu çalışmada optimizasyon yöntemi olarak, literatürde yaygın olarak kullanılan PSO algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmada, bir otomatik gerilim regülatörü sisteminde optimal PID kazançlarının belirlenmesi için en iyi amaç fonksiyonu araştırılmıştır. Belirlenen polinomal amaç fonksiyonuna göre PID parametreleri olan K_p , K_i , K_d 'nin optimum değerleri elde edilmiştir. Elde

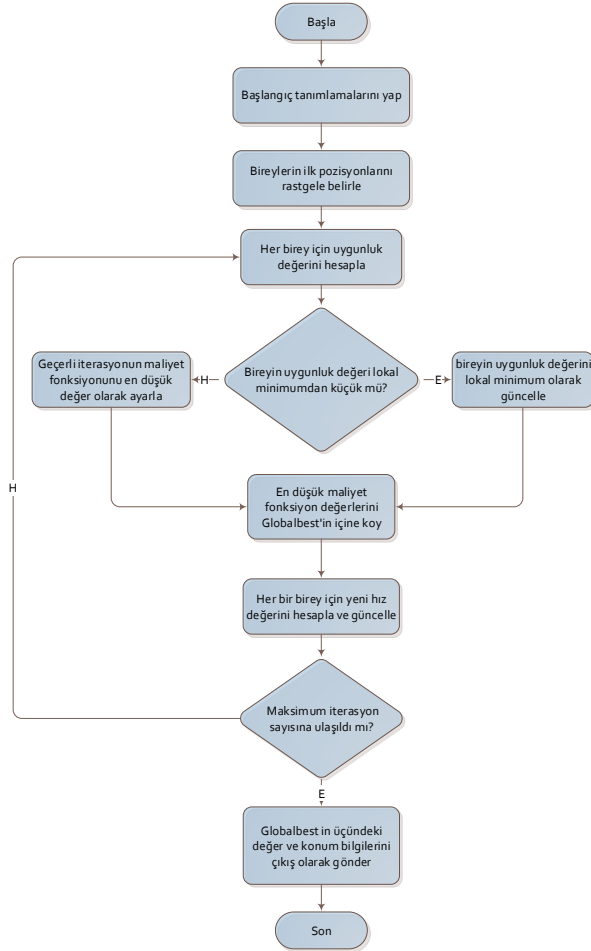
edilen bu parametreler OGR sisteminde kullanılarak ve zaman domain cevapları elde edilmiş ve parametrelerin doğrulanması yapılmıştır.

Parçacık sürüsü optimizasyonu

Kennedy ve Eberhart tarafından tanımlanan PSO, modern sezgisel algoritmalarından biridir. Kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek oluşturulmuş sezgisel bir algoritmadır (Coello Coello ve Reyes-Sierra, 2006).

Kuşlar yiyecek ararken yiyeceğe en yakın kuşu takip ederler. Takip edilen kuş, Lider kuş olarak adlandırılır ve yiyeceğin aranması esnasında lider kuş değişebilir. Sürüde yiyeceği gören yeni kuş lider kuş olarak seçilir ve sürüdeki tüm kuşlar yeni lider kuşa yönelerek yiyecek arayışına devam ederler. Sürüdeki kuşlar lider kuşu belirlemek ve yiyeceğe yaklaşmak için kendi aralarında iletişim kurarlar. Sürüdeki her bir kuş parçacık olarak nitelendirilir ve her bir kuş bir çözümü ifade eder. Sürüdeki her bir kuşun o anki pozisyonu ise çözümü aranan fonksiyon için bir giriş olarak kabul edilir. Dolayısıyla kuş hareket ederken kuşun her bir pozisyonu fonksiyona iletilir ve o anki pozisyon için bir çözüm üretilir. Elde edilen çözüm değerlendirilir ve çözümün uygunluk değeri belirlenir. Uygunluk değeri sonuca ulaşıp ulaşılmadığının bir ölçüsüdür. Belirlenen kriterler doğrultusunda istenilen sonuç bulunmuşsa arama sona erer, istenilen sonuç bulunamamışsa kuşlar arama uzayında dolaşmaya devam ederler (Coello Coello ve Reyes-Sierra, 2006). PSO'nun genel bir blok diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.

PSO, sonuca hızlı bir şekilde ulaşması, yerel optimumlara takılma ihtimalinin az olması ve az sayıda parametre gerektirmesi nedenleriyle diğer çoğu arama algoritmasına karşı üstünlük kurmuştur (Ortakçı, Yasin; Göloğlu, 2012). PSO'da her bir parçacık rastgele konum ve hız değerleri ile aramaya başlatılır. Yinelenen her bir iterasyonda hız ve konum değerleri güncellenip uygunluk fonksiyonunda bir uygunluk değeri oluşturulur.



Şekil 1. PSO'nun genel yapısı

Ayrıca yinelenen her bir iterasyonda parçacıkların yerel optimum değeri ve sürünün global optimum değeri güncellenir. Belirli bir iterasyon sonunda sürünün optimum değeri PSO'nun probleme sunduğu çözüm olur (Ortakçı, 2011).

Çok amaç fonksiyonlu optimizasyon

ÇAFO, birden fazla amacın eşzamanlı gerçekleşmesinin düşünüldüğü bir optimizasyon yöntemidir. Çoğu problemde olası çözümlerden yalnızca birini seçme zorunluluğu her zaman gerçekçi ve doğru olmaz (Joro vd., 1998). Çoğu karar probleminde çok amaçlılık söz konusudur. Her bir amaç için optimum olan çözüm diğer bir amaç için de optimum olmayabilir. ÇAFO'nun tek amaç fonksiyonlu optimizasyona tercih edilmesinin nedeni de bu amaç fonksiyonlarının optimum çözümlerinin birbirinden farklı olmasıdır. ÇAFO problemlerinin çözümüne

yönelik birçok yaklaşım vardır. En temel yaklaşım "Skalarizasyon", diğer bir ifade ile "bir araya getirme" yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, tek bir amaç elde etmek için tüm amaçların bir araya getirilmesi ilkesine dayanır (Marler ve Arora, 2005). Böylelikle ÇAFO'da amaçlar tek bir amaca indirgenerek çözülür. En yaygın olarak bilinen skalarizasyon tekniği "Ağırlıklı Toplam" tekniğidir (Koski ve Silvennoinen, 1987; Saramago ve Steffen Jr., 1998; Marler ve Arora, 2010).

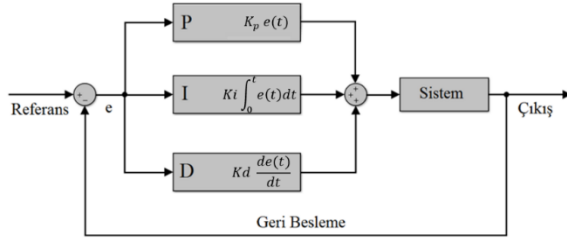
ÇAFO problemi'nin çözümünden "tercihe dayalı" sonuçlar elde edilmektedir (Trautmann ve Mehnen, 2009). Skalarizasyon tekniği ile amaçlar tek bir amaca indirgenir ve bunun sonunda tek bir sonuç ortaya çıkar. Ağırlıklı toplam tekniğinde kullanılan her bir parametrenin 0 ve 1 arasında değişen bir ağırlık değeri vardır. En iyi sonucun elde edilmesi için kullanılan parametrelerin ağırlık değerleri değiştirilir ve problem yeniden çözülür. Optimizasyon problemi ağırlıklı toplam tekniği ile Denklem(1)'deki gibi modellenir.

$$m = \text{Min} \sum_{i=1}^k w_i f_i(x), \quad 1 \geq w_i \geq 0 \quad (1)$$

ÇAFO problemleri'nde amaç, tercihe dayalı bir sonuç kümesi elde etmektir. Denklem(1) kullanılarak Ağırlıklı Toplam tekniği ile bir çözüm kümesi oluşturulur ve ağırlık değerleri 0 ile 1 arasında sistematik bir şekilde değiştirilerek her bir ağırlık değeri için yeni bir sonuç bulunur (Akça, 2015).

PID Denetleyici

PID endüstride yaygın olarak kullanılan geri beslemeli bir kontrol yöntemidir. Modern kontrol yöntemlerindeki gelişmelere rağmen PID Denetleyiciler, basit ve kararlı bir yapıda olmaları sebebiyle endüstriyel uygulamalarda çokça kullanılmaktadır. Denetleyicinin ve sistemin genel yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. PID Denetleyicinin genel yapısı

PID Kontrol Yöntemi oransal, türevsel ve integral yöntemlerin birleşmesiyle oluşur. PID denetleyici 3-modlu denetleyici olarak da bilinir. PID Kontrol Yöntemi bir veya iki kontrol yönteminin hatayı kabul edilebilir limitler içerisinde tutamadığı hızlı ve büyük yük değişimlerinin olduğu işlemlerde kullanılmaktadır. Kontrol edilecek sistemin çıkışı ile PID denetleyicinin girişi olan referans değerinin farkı hata (e) olarak hesaplanır. Hata değeri K_p parametresiyle, hatanın türevi K_d parametresiyle, hatanın integrali K_i parametresiyle çarpılarak elde edilen değerlerin toplamı sisteme giriş olarak uygulanır. Sistemin çıkışı tekrar referans değer ile karşılaştırılarak yeni bir hata değeri hesaplanır ve denetleyicinin üreteceği yeni çıkış sisteme giriş olarak uygulanır. Bu işlemler hata sıfır olana kadar tekrarlanmaktadır. Denetleyicinin K_p , K_d ve K_i parametreleri sisteme özeldir ve bu parametreleri belirlemek için birçok yöntem vardır. Kullanılan en yaygın yöntem ZieglerNichols yöntemidir (Ziegler ve Nichols, 1993). PID denetleyicinin transfer fonksiyonu ise Denklem(2)'de gösterilmektedir.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (2)$$

PID denetleyici ile sistemin uygun şekilde kontrol edilebilmesi, denetleyici parametreleri olan K_p , K_i ve K_d değerlerinin doğru belirlenmesi ile mümkündür (Erkol, 2017).

PID Denetleyici parametrelerinin belirlenmesi

PSO gibi optimizasyon algoritmaları belirlenen optimizasyon problemini minimize etmek için gereken parametreleri bulurlar. Bu nedenle PID parametrelerinin optimizasyonu için bir

fonksiyon tanımlamak gerekir. Tanımlanan bu fonksiyona “amaç fonksiyonu” denir. PID algoritmaların optimizasyonu için literatürde mutlak hatanın toplamı (Integral Absolute Error (IAE)), hata karelerinin toplamı (Integral Squared Error (ISE)), zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı (Integral Time-weighted Squared Error (ITSE)), zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (Integral Time-weighted Absolute Error (ITAE)) gibi fonksiyonlar önerilmiştir(Campo, 2012). Bu fonksiyonlar, zaman ile meydana gelen hatanın büyüklüğünü vermektedir ve optimizasyon probleminde bu fonksiyonun minimize edilmesi, PID parametrelerinin en az hatayı verecek şekilde ayarlanması demektir(Maiti vd., 2008). ISE, IAE, ITSE ve ITAE fonksiyonları Denklem(3), Denklem(4), Denklem(5) ve Denklem(6) da belirtildiği gibidir.

$$f(ISE) = \int_0^T e^2(t) dt \quad (3)$$

$$f(IAE) = \int_0^T |e(t)| dt \quad (4)$$

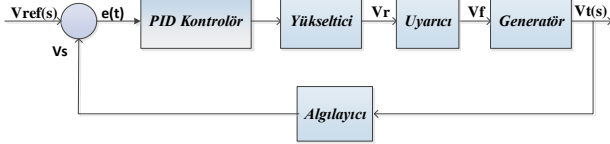
$$f(ITSE) = \int_0^T t \cdot e^2(t) dt \quad (5)$$

$$f(ITAE) = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (6)$$

Otomatik gerilim regülatörü (OGR) sistemi

Güç sistemlerinde enerji akışı üretim merkezlerinden tüketim merkezlerine doğrudur. Bu enerji akışı, sistem kararlılığı açısından talep üzerine sürekli olarak sağlanmalıdır (Taylor, 1982; Kundur, 1994). Sistem frekansı ve sistem gerilimi istenilen değerlerde tutulamadığı takdirde güç sistemi bloke olabilir. Bu durum bir güç sistemi için en trajik durumlardan biridir. Bir güç sisteminde sistem geriliminin sabit bir değerde olması çok büyük önem taşır (Van Cutsem ve Vournas, 2008). Dolayısı ile güç sisteminde gerilim düşüşlerinin engellenmesi gerekir. OGR, generatör çıkış gerilimini nominal bir sabit gerilim düzeyinde tutmak üzere tasarlanmıştır. OGR'ler generatör terminal gerilimini alan akımı ile düzenler ve bunun sonucunda çıkış gerilimini korurlar. OGR sistemi terminal gerilimini istenen değere getiren kapalı bir döngü kontrol sistemidir (Yegireddy ve Panda, 2014).

Basit bir otomatik gerilim regülatörü; yükseltici, uyarıcı, generatör ve algılayıcıdan oluşur. OGR sisteminin dinamik tepkisini iyileştirmek ve terminal gerilimini 1.0 pu'da tutmak için sisteme bir PID denetleyici dahil edilir (Yegireddy ve Panda, 2014). PID Denetleyicili OGR'nin blok diyagramı Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. PID Denetleyicili OGR sistemin blok diyagramı

a) Yükseltici

Bir yükselticinin transfer fonksiyonu Denklem (7)'de verilen bir kazanç ve bir zaman sabiti ile oluşturulur. Burada K_a yükselticinin kazancı ve T_a yükselticinin zaman sabitidir.

$$TF_a = \frac{K_a}{1+sT_a} \quad (7)$$

K_a 'nın olağan değerleri 10-40 aralığındadır. Yükselticinin zaman sabiti T_a ise 0.02 ile 0.1 s aralığındadır.

b) Uyarıcı

Bir uyarıcının transfer fonksiyonu Denklem (8)'de verilen bir kazanç ve bir zaman sabiti ile oluşturulur. Burada K_e uyarıcının kazancı ve T_e uyarıcının zaman sabitidir.

$$TF_e = \frac{K_e}{1+sT_e} \quad (8)$$

K_e 'nin tipik değerleri 1-10 aralığındadır ve T_e zaman sabiti 0.4-1.0s aralığı içindedir.

c) Generatör

Bir generatörün transfer fonksiyonu Denklem(9)'da verilmiştir.

$$TF_g = \frac{K_g}{1+sT_g} \quad (9)$$

Generatör kazancı K_g ve zaman sabiti T_g yüke bağlıdır. K_g , 0.7 ile 1.0 arasında ve T_g , 1.0 ile 2.0s arasında tam yükten yüksüze değişir.

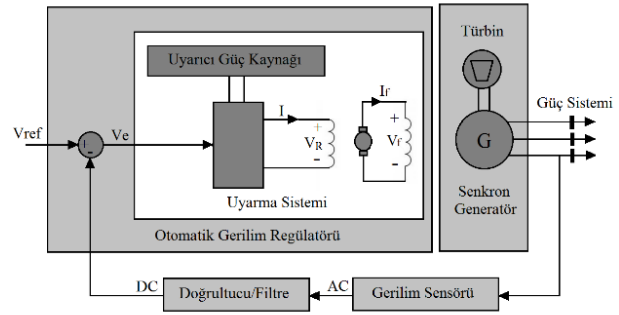
d) Algılayıcı

Bir algılayıcının transfer fonksiyonu Denklem(10)'da verilmiştir.

$$TF_s = \frac{K_s}{1+sT_s} \quad (10)$$

Normal olarak T_s , 0.001 ila 0.06s arasındadır ve K_s , yaklaşık 1.0'dır.

Şekil 4'te bir OGR sistemin şematik diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4. OGR Sistemin şematik diyagramı (Özdemir ve Çelik, 2017)

Şekil 4'te verilen OGR sistemin şematik diyagramı göz önüne alındığında, generatörün çıkış gerilimindeki herhangi bir değişim terminal gerilimini değiştirir. Gerilim sensörü ile ölçülen gerilim değeri OGR'ye gönderilir. OGR, generatörün terminal gerilimini istenilen gerilim değerinde tutmak için uyarma sisteminin terminal gerilimini değiştirir. Böylece generatörün alan akımı değiştirilmiş olur. Ayrıca bu durum üretilen EMF'yi de değiştirir. Generatörün güç üretimi yeni denge noktasına ayarlanır ve terminal gerilimi istenilen değerde tutulur (Dembicki ve Chi, 1989).

Optimum çok amaç fonksiyonunun elde edilmesi

Bu çalışmada bir OGR sistem için PID parametreleri PSO algoritması ve ÇAFO yöntemi ile belirlenmiştir. OGR sistem ve PID denetleyici Matlab/Simulink ortamında modellenmiş ve sistemin benzetimi gerçekleştirilmiştir. PID parametreleri olan K_p ,

K_i ve K_d değerleri öncelikli olarak ISE, IAE, ITSE ve ITAE amaç fonksiyonları kullanılarak PSO ile elde edilmiş olup, bu değerler ile OGR sistemin birim basamak cevabı incelenmiştir. OGR sistemde ISE, IAE, ITSE ve ITAE amaç fonksiyonlu PSO ile elde edilen parametreler kullanıldığında sistemin birim basamak cevabındaki artışın, maksimum aşma(M_p), yerleşme zamanı(t_s), yükselme zamanı(t_r) ve salınım sayısı(n) açısından yetersiz olduğu görülmüş ve K_p , K_i ve K_d parametreleri ÇAFO ile yeniden elde edilmiştir. M_p , t_s , t_r , n , minimum yerleşme(ms) ve hata fonksiyonları(e) birer amaç fonksiyonu olarak seçilmiş ve problem ÇAFO ile tek bir amaç fonksiyonuna indirgenerek çözülmüştür. Önerilen maliyet fonksiyonu Denklem(11)'de ifade edilmiştir.

$$f(K)min = (10.e) + (0,1.n) + (10.ts) + (5.tr) + (20.(1 - ms) + (1.((10^{Mp-1}) - 1))) \quad (11)$$

$$f(K)min = (a.e) + (b.n) + (c.ts) + (d.tr) + (f.(1 - ms) + (g.((10^{Mp-1}) - 1))) \quad (12)$$

$$a + b + c + d + f + g = 1 \quad (13)$$

Denklem(12)'deki a, b, c, d, f ve g katsayıları ağırlık değerleridir ve 0 ile 1 arasında değişebilir. Bu ağırlık değerleri değiştirilerek yeni bir tek amaç fonksiyonlu optimizasyon problemi elde edilir. Bu çalışma kapsamında belirlenen maliyet fonksiyonundaki ağırlık değerleri aşağıdaki gibidir.

$$a=0.2169197397; \quad b=0.0021691974$$

$$c=0.2169197397; \quad d=0.1084598698$$

$$f=0.4338394793; \quad g=0.0216919739$$

Sistemin birim basamak cevabının sürekli duruma geçtiği durum, sistem geriliminin $\pm\%5$ 'lik değerler arasında kaldığı durum olarak kabul edilmiştir. Salınım sayısı(n)'nın, bir Matlab yazılımı yardımıyla birim basamak cevabının sürekli duruma geçtiği ana kadar sayılması sağlanmıştır. Böylece sistemin birim basamak cevabının yerleşmesinden sonraki salınımlar sayılmamıştır. Denklem(12)'deki maliyet fonksiyonuna göre elde edilen PID parametreleri ile OGR sistemin birim basamak cevabı incelenmiş ve önerilen ÇAFO yaklaşımının OGR sisteminin birim basamak cevabını arttırmada ISE, IAE, ITSE ve ITAE amaç fonksiyonlu PSO'ya göre daha verimli olduğu görülmüştür.

Benzetim sonuçları

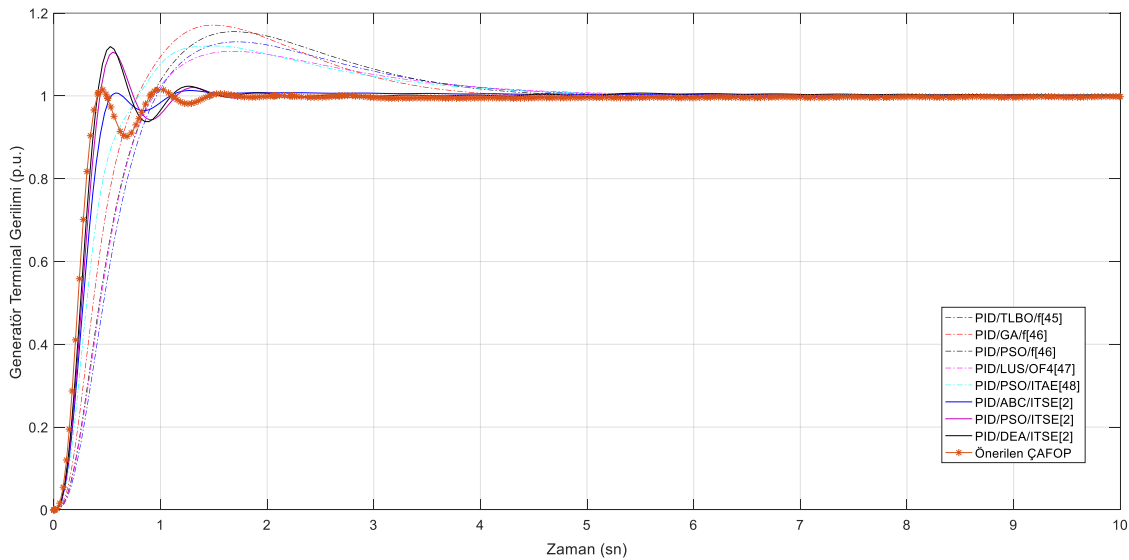
OGR sistem ilk olarak ISE, IAE, ITSE ve ITAE amaç fonksiyonları kullanılarak PSO ile optimize edilmiştir. Sistem ayrıca farklı optimizasyon yöntemleri ile de optimize edilerek, maksimum aşma, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı açısından sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre önerilen ÇAFO yöntemi ve bazı optimizasyon yöntemleri ile elde edilen PID parametre değerleri Tablo 1'de, elde edilen veriler ise Tablo 2'de gösterilmektedir. Farklı optimizasyon yöntemleri ile optimize edilen OGR sistemin birim basamak cevabı Şekil 5'te verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen ÇAFO ile bazı optimizasyon yöntemleri ile elde edilen PID parametre değerleri

	K_p	K_i	K_d
PID/TLBO(Chatterjee ve Mukherjee, 2016)	0.5302	0.4001	0.1787
PID/GA/f(Gaing, 2004)	0.8861	0.7984	0.3158
PID/PSO/f(Gaing, 2004)	0.6568	0.5393	0.2458
PID/LUS/OF4(Mohanty vd., 2014)	0.6190	0.4222	0.2058
PID/PSO/ITAE(Panda vd., 2012)	1.3541	0.9266	0.4378
PID/ABC/ITSE(Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	1.6524	0.4083	0.3654
PID/PSO/ITSE(Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	1.7774	0.3827	0.3184
PID/DEA/ITSE(Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	1.9499	0.4430	0.3427
Önerilen ÇAFO	2.6148	0.3552	0.5244

Tablo 2. Önerilen ÇAFO ile bazı optimizasyon yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılmasına yönelik elde edilen veriler

	MP(p.u.)	TR(s)	TS(s)	FOD	ISE	IAE	ITSE	ITAE	ÇAFO
PID/TLBO(Chatterjee ve Mukherjee, 2016)	1.1306	0.5965	4.0102	1.3384	0.3917	0.7456	0.1287	0.7439	64.7195
PID/GA/f(Gaing, 2004)	1.1709	0.4753	3.5078	1.2236	0.3307	0.6827	0.1128	0.7073	60.1946
PID/PSO/f(Gaing, 2004)	1.1551	0.5681	3.8851	1.3183	0.3716	0.7425	0.1320	0.7637	64.6690
PID/LUS/OF4(Mohanty vd., 2014)	1.1076	0.5679	4.0387	1.3449	0.3629	0.6895	0.1061	0.6883	64.0010
PID/PSO/ITAE(Panda vd., 2012)	1.1205	0.4308	3.8835	1.3464	0.2715	0.5853	0.0748	0.6253	61.1997
PID/ABC/ITSE(Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	1.0130	0.3015	0.9796	0.2577	0.2246	0.3330	0.0299	0.1976	24.7442
PID/PSO/ITSE(Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	1.1056	0.2601	1.3198	0.4566	0.2160	0.3247	0.0279	0.1491	29.4631
PID/DEA/ITSE(Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	1.1191	0.2457	1.3367	0.4766	0.2085	0.3247	0.0265	0.2157	30.4536
Önerilen ÇAFO	1.0155	0.2328	0.8589	0.2401	0.1882	0.2951	0.0217	0.2177	23.5501



Şekil 5. Farklı optimizasyon yöntemleri ile optimize edilen OGR sistemin birim basamak cevabı

FOD(Figure of Demerit)(Chatterjee ve Mukherjee, 2016) fonksiyonu Denklem (14)'te verilmiştir.

$$FOD = (1 - e^{-\beta})(Mp + Ess) + e^{-\beta}(Ts - Tr) \quad (14)$$

Önerilen ÇAFO ile en iyi yerleşme zamanı değeri, en iyi yükselme zamanı değeri, ikinci en iyi maksimum aşma değeri ve en düşük maliyet değeri elde edilmiştir. Önerilen ÇAFO ile elde edilen veriler, FOD fonksiyonunda da diğer yöntemlere kıyasla en düşük maliyet değerini vermektedir. ÇAFO fonksiyonu, diğer yöntemlerle elde edilen verilerle oluşturulduğunda en düşük maliyet değeri yine ÇAFO ile elde edilmiştir. Sonuç olarak, elde

edilen veriler incelendiğinde önerilen ÇAFO yönteminin diğer yöntemlere göre birçok açıdan daha üstün olduğu gösterilmiştir.

Sonuç

Bu çalışmada çok amaç fonksiyonlu optimizasyon(ÇAFO) kullanılarak PID denetleyici parametrelerinin belirlenmesine yönelik bir yöntem sunulmuştur. Yöntemde maliyet fonksiyonundaki giriş değerlerine karşılık çıkış performansı ağırlık değerlerine bağlı olarak incelenmiş ve optimum çözüme ulaşılmıştır. Problemden Mp, ts, tr, salınım sayısı, minimum yerleşme ve hata (e) fonksiyonları birer amaç fonksiyonu olarak seçilmiş ve bu amaç fonksiyonları ayrı ayrı eş zamanlı olarak

çözülmüştür. Bu amaç fonksiyonlarına göre birden fazla en iyi çözüm elde edilmiştir. Elde edilen en iyi çözümler ile ÇAFO için yukarıda belirtilen parametrelerin sistem performansına göre korelasyon değeri belirlenerek tek bir en iyi çözüm bulunmuştur. Bulunan en iyi çözüm tercihe dayalı bir çözümdür, maliyet fonksiyonundaki ağırlık faktörlerine bağlı olarak değişebilir. ÇAFO ile elde edilen PID parametreleri olan K_p , K_i ve K_d değerleri OGR sisteme uygulanıp, sistemin zaman domain benzetimi yapılmıştır. Ayrıca aynı sistem ISE, IAE, ITSE ve ITAE kullanılarak PSO ve birçok yöntem ile optimize edilmiştir. Benzetim sonuçları ÇAFO yöntemiyle maksimum aşmanın, yerleşme zamanının ve yükselme zamanının birçok yönetime göre çok daha düşük olduğunu ve dolayısı ile OGR sistemde kullanılan ÇAFO yönteminin diğer birçok yönetime göre birim basamak cevabını arttırmada daha verimli olduğunu göstermektedir.

Kaynaklar

- Akça, E. (2015). *Genel Atama Problemlerinin Grafik İşlemci Birimlerinin Üzerinde Çözümü*. Ankara Üniversitesi.
- Akyol, S., Alataş, B. (2012). Güncel Sürü Zekâsı Optimizasyon Algoritmaları. *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1, 36–50.
- Alataş, B. (2007). *Kaotik Haritalı Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritmaları Geliştirme*. Fırat Üniversitesi.
- Campo, A.B. (2012). PID Control Design. İçinde *MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 1*. InTech.
- Chatterjee, S., Mukherjee, V. (2016). PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique. *International Journal of Electrical Power ve Energy Systems*, 77, 418–429.
- Coello Coello, C.A., Reyes-Sierra, M. (2006). Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2.
- Coşkun, İ., Terzioğlu, H. (2007). Hız Performans Eğrisi Kullanılarak Kazanç (P_{id}) Parametrelerinin Belirlenmesi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 6, 180–205.
- Crnosija, P., Krishnan, R., Bjazic, T. (2006). Optimization of PM Brushless DC Motor Drive Speed Controller Using Modification of Ziegler-Nichols Methods Based on Bodé Plots. İçinde *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*. (ss. 343–348). IEEE.
- Van Cutsem, T., Vournas, C. (2008). *Voltage stability of electric power systems*,
- Dembicki, E., Chi, T. (1989). System analysis in calculation of cantilever retaining walls. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13, 599–610. Available at: <http://www.loc.gov/catdir/description/mh022/93039219.html>.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, a (1991). The ant system: An autocatalytic optimizing process. *TR91-016, Politecnico di Milano*, 1–21. Available at: http://lis.nsysu.edu.tw/exam/doctor/mana/inform/inform_93.pdf.
- Eberhart, R.C., Shi, Y. (1998). Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. İçinde *Evolutionary Programming VII*. (ss. 611–616).
- Erkol, H.O. (2017). GA ve PSO ile Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7, 179–185.
- Gaing, Z.L. (2004). A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19, 384–391. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1300705>.
- Gozde, H., Taplamacioglu, M.C. (2011). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *Journal of the Franklin Institute*, 348, 1927–1946.
- Joro, T., Korhonen, P., Wallenius, J. (1998). Structural comparison of data envelopment analysis and multiple objective linear programming. *Management Science*, 44, 962–970.
- Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, 4, 1942–1948 c.4.
- Keskintürk, T. (2006). Diferansiyel gelişim algoritması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5, 85–99.

- Koski, J., Silvennoinen, R. (1987). Norm methods and partial weighting in multicriterion optimization of structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24, 1101–1121.
- Kundur, P. (1994). Power system stability and control. *McGraw-Hill*, 45–138.
- Maiti, D., Acharya, A., Chakraborty, M., vd. (2008). Tuning PID and Fractional PID Controllers using the Integral Time Absolute Error Criterion. İçinde *Proceedings of the 2008 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability, ICIAFS 2008*. (ss. 457–462).
- Marini, F., Walczak, B. (2015). Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 149, 153–165.
- Marler, R.T., Arora, J.S. (2005). Function-transformation methods for multi-objective optimization. *Engineering Optimization*, 37, 551–570.
- Marler, R.T., Arora, J.S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26, 369–395.
- Marler, R.T., Arora, J.S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41, 853–862.
- Mayer, D.G., Kinghorn, B.P., Archer, A.A. (2005). Differential evolution – an easy and efficient evolutionary algorithm for model optimisation. *Agricultural Systems*, 83, 315–328.
- Mohanty, P.K., Sahu, B.K., Panda, S. (2014). Tuning and Assessment of Proportional–Integral–Derivative Controller for an Automatic Voltage Regulator System Employing Local Unimodal Sampling Algorithm. *Electric Power Components and Systems*, 42, 959–969.
- Montiel, O., Sepulveda, R., Melin, P., vd. (2007). Performance of a Simple Tuned Fuzzy Controller and a PID Controller on a DC Motor. İçinde *2007 IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence*. (ss. 531–537). IEEE.
- Obika, M., Yamamoto, T. An evolutionary design of robust PID controllers. İçinde *IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005*. (ss. 101–106). IEEE.
- Ortakçı, Yasin; Göloğlu, C. (2012). Parçacık Sürü Optimizasyonu İle Küme Sayısının Belirlenmesi.
- Ortakçı, Y. (2011). *Parçacık Sürü Optimizasyonu Yöntemlerinin Uygulamalarla Karşılaştırılması*. Karabük Üniversitesi.
- Özdemir, M.T., Çelik, V. (2017). PI Kontrolörlü Otomatik Gerilim Regülasyon Sisteminin Kararlılık Analizi. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21, 1–1. Available at: <http://dergipark.gov.tr/doi/10.16984/saufenbild.270251> [Erişim Temmuz 13, 2017].
- Özdemir, M.T., Öztürk, D., Eke, İ., vd. (2015). Tuning of Optimal Classical and Fractional Order PID Parameters for Automatic Generation Control Based on the Bacterial Swarm Optimization. İçinde *IFAC-PapersOnLine*. (ss. 501–506).
- Panda, R.C., Yu, C., Huang, H. (2004). PID tuning rules for SOPDT systems: review and some new results. *ISA transactions*, 43, 283–295.
- Panda, S., Sahu, B.K., Mohanty, P.K. (2012). Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 349, 2609–2625.
- Rubaii, A., Young, P. (2011). EKF-Based PI/PD-Like Fuzzy-Neural-Network Controller for Brushless Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47, 2391–2401.
- Saramago, S.F.P., Steffen Jr., V. (1998). Optimization of the Trajectory Planning of Robot Manipulators Taking Into Account the Dynamics of the System. *Mechanism and Machine Theory*, 33, 883–894.
- Shou-Rong Qi, Dong-Feng Wang, Pu Han, vd. Grey prediction based RBF neural network self-tuning PID control for turning process. İçinde *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.04EX826)*. (ss. 802–805). IEEE.
- Storn, R., Price, K. (1995). Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *Technical report, International Computer Science Institute*, 1–15.
- Taylor, C. (1982). Power System Voltage Stability. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101.
- Trautmann, H., Mehnen, J. (2009). Preference-based Pareto optimization in certain and noisy environments. *Engineering Optimization*, 41, 23–38.

- Tutkun, N., Maden, D. (2010). Determination of the PID controller parameters for a DC shunt motor using the genetic algorithm method. İçinde *2010 National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, ELECO 2010*.
- Visioli, A. (2001). Tuning of PID controllers with fuzzy logic. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, 148, 1–8.
- Yegireddy, N.K., Panda, S. (2014). Design and performance analysis of PID controller for an AVR system using multi-objective non-dominated shorting genetic algorithm-II. İçinde *2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG)*. (ss. 1–7). IEEE.
- Yoshida, H., Kawata, K., Fukuyama, Y., vd. (2000). A Particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15, 1232–1239.
- Yun Li, Kiam Heong Ang, Chong, G.C.Y. (2006). PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems Magazine*, 26, 32–41.
- Ziegler, J.G., Nichols, N.B. (1993). Optimum Settings for Automatic Controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 115, 220.

Determination of Multi-objective optimization for Optimum Automatic Voltage Regulation in Power Systems

Extended Abstract

In electrical power systems, system voltage is one of the most important parameters effecting the power quality and has a critical importance. Voltage control in power systems is done by automatic voltage regulator (AVR). The main task of the AVR is to control the excitation current when the load changes, so that the generator terminal voltage will be constant at the specified values. Providing the stability of the nominal voltage level in a power system is one of the main control problems of the power system because all devices connected to this power network are designed for a certain voltage level. AVR is a critical element for the power system. Therefore, no matter how small the change in the terminal voltage is, it should detect these changes well and produce a feedback signal proportional to this value using its proportional control structure. There are many control methods used in application. One of the most widely known and used control methods is the PID. The proper control of the system with the PID controller is possible by correct identification of the controller parameters K_p , K_i and K_d . Therefore, it is very important to correctly determine the PID controller parameters in an AVR system. There are many methods used to determine PID controller parameters. Heuristic optimization methods are frequently used in determining PID parameters. One of the best ways to specify these parameters is to use optimization techniques. The objective functions used in these techniques are generally ITSE, ITAE, ISE and IAE. However, the objective function should change according to the system, problem and constraint features. It is necessary for the optimization to be done by considering multiple objectives. Within a limited time, obtaining the best objective function by considering more than one objective for automatic voltage regulators bring about a multi objective functional optimization (MOO) problem. In MOO, Multi-objective affect the solution according to the order of importance. The solution set includes other solutions that can meet all the objectives as much as possible. The ultimate objective is to select and use the most optimal solution from the solution set according to the user preference. In this paper, it is aimed to find the best objective function for

determining the optimal PID gains in an AVR system and it is suggested to use it in AVR problems. In the paper, the multi objective fitness function was reduced to more than one single-objective function optimization problem by the scalarization technique, and each reduced problem was solved simultaneously and separately. In order to give the comparable effect of the study, PSO, a well-known method in literature, was used.

In the proposed technique, the output performance which was obtained according to the input values in the cost function was examined depending on the weight values, and the optimum solution was obtained. M_p , t_s , t_r , number of oscillations (n), minimum settling (ms) and error (e) functions were chosen as objective functions and these functions were solved simultaneously and separately. According to these objective functions, more than one best solution was achieved. The best solution was found by the correlation value which was specified according to the system performance and calculated with the help of the best-obtained solutions and the MOO parameters mentioned above.

Controller gains were obtained by PSO which was run according to the proposed objective function. The time domain simulation of the gain values achieved by the proposed technique and obtained from the literature studies on the same system was carried out. The unit step response of the AVR system was compared in terms of maximum overshoot, settling time and rise time. According to the obtained data, the best settling time value, the best rise time value, the second best maximum overshoot value and the lowest cost value were obtained with the proposed MOO. As compared to other methods the data obtained with the proposed MOO also gives the lowest cost value in figure of demerit (FOD) function. When MOO function was constructed with the data achieved by other methods, the lowest cost value was obtained with MOO. As a result, when the obtained data are examined, it is seen that the proposed method is superior to other methods in many respects.

Keywords: Automatic Voltage Regulator; Multi-objective Optimization; Particle Swarm Optimization