

SSSC tabanlı kaskad kontrolör ile güç sistem kararlılığının iyileştirilmesi

Mustafa NALBANTOĞLU¹, Yavuz GÜLER^{*2},

¹ Kilis 7Aralık Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kilis

² Muş Alparslan Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Muş

Makale Gönderme Tarihi: 12.07.2016

Makale Kabul Tarihi: 09.11.2016

Öz

Kontrol sistemlerinde sisteme herhangi bir bozucu geldiğinde bu sistemin bozucu karşısında iyi bir performans göstermesi gerekir. Klasik kontrol sisteminin bir alternatifi olan Kaskad Kontrol yöntemi, özellikle öngörülmeyen bozucuların varlığında kontrol sisteminin performansını artırmaktadır. Bu çalışmamızda, Statik Senkron Seri Kompansatör (SSSC) içeren sonsuz baraya bağlı tek makineli güç sisteminde kaskad kontrolör yapısı kullanılarak sistemin kararlılığının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Kaskad kontrol yapısında iç ve dış döngüde klasik PID (Oransal + İntegral + Türevsel) tip kontrolörler kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki kaskad kontrol yapının iç döngüsünde PI, dış döngüsünde ise PID kontrolörler kullanılmıştır. Kaskad kontrol yapısının iç ve dış döngüsünde bulunan kontrolörlerin ayar parametre değerleri Genetik Algoritma (GA) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Önerilen kaskad kontrolörün performansı, literatürde bulunan sonsuz baraya bağlı tek makineli güç sisteminin SSSC için sönümleme kontrolörü ve klasik PID kontrolörü performansları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sonucunda normal yük durumunda önerilen kaskad kontrolörün, SSSC için sönümleme kontrolörüne göre %19, klasik PID kontrolörüne göre de %14 daha iyi performans göstermiştir. Ağır yük durumunda, önerilen kaskad kontrolörün, SSSC için sönümleme kontrolörüne göre %21, klasik PID kontrolörüne göre de %14 daha iyi performans göstermiştir. Hafif yük durumu şartlarında ise önerilen kaskad kontrolörün, SSSC için sönümleme kontrolörüne göre %10, klasik PID kontrolörüne göre de %7 daha iyi performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Güç Sistemleri; SSSC; Kaskad Kontrol; Genetik Algoritma; PID kontrolör.

Giriş

Günümüzde değişen enerji talebine bağlı olarak enerji iletim sistemlerinde kontrol edilebilirlik ve iletim sistem kapasitesinin artırılması konuları son derece önem kazanmaya başlamıştır (Eminoğlu, 2003). Güç sistemlerinin bağlantılarının büyüüp çeşitlenmesi, yeni teknolojilerin ve denetim sistemlerinin kullanılması ve güç sistemlerinin aşırı yüklü koşullarda çalışmasının artması ile birlikte sistem kararsızlığının değişik şekilleri ortaya çıkmıştır. Örneđin, gerilim kararlılığı, frekans kararlılığı ve bölgeler arası salınımlar geçmişten daha fazla ilgiyi üzerine almaya başlamıştır (Dirik, 2006). Güç sistemlerinde oluşan karmaşık yapılar nedeniyle ve bu güç sistemlerinin aşırı yüklenmesi ile aşırı reaktif güç ihtiyacının oluşması ve güç sistemlerinin yeterince kontrolünün yapılamaması ile güç sistemlerinde büyük dinamik salınımların oluşmasına neden olur. Ayrıca, güç sistemlerinde geçici ve sürekli hal kararsızlığı, güç sistemlerinde oluşan gerilim çökmeleri ve düşük transfer kapasiteleri gibi birçok sorunu beraberinde getirir (Kaya, 2006). Hatların yüksek kapasitelerde kullanımı ve sürekli değişen talep güç nedeniyle yük baralarında gerilim değişimleri oluşur. Bu gerilim değişimlerinin en önemli nedenlerinden biri, yük baralarındaki reaktif güç talepleridir (Köse, 2012).

Geleneksel güç sistemlerinde güç iletim sisteminin parametrelerinin (güç ve gerilim gibi) denetimi için kullanılan yöntemler bazen yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden dinamik koşullar altında güç sistemine hızlı ve etkin bir şekilde müdahale edilerek sistemin yeni koşullara uyumunun sağlanması amacıyla esnek AC iletim sistemleri (Flexible AC Transmission Systems-FACTS) geliştirilmiştir (Dirik, 2006). FACTS denetleyicileri güç akış kontrolünde ve sistemlerin geçici ve kalıcı kararlılığını iyileştirmede kullanılabilir ve güç sistemi salınımları azaltılabilmektedir. Söz konusu cihazlar ayrıca elektrik iletim maliyetini düşürmekte, güç osilasyonlarını ve reaktif güç akışını azaltmakta ve bunun sonucunda hattın daha fazla aktif güç taşınmasını sağlamaktadır.

FACTS denetleyicileri güç elektroniği temelli olduğundan, sistemlerin davranışlarındaki hızlı değişimleri karşısında hızlı cevap verebilme özelliğine sahiptirler. Genel olarak FACTS denetleyicileri, enerji iletim sistemlerin genel olarak kontrolünü sağlayıp, sistemde iletilen güç kapasitesini artırmak, hızlı ve etkin denetim yapılmasını sağlar (Mathur ve Varma, 2002; Hingorani ve Gyugyi, 1999; Padiyar, 2007; Song ve Johns, 1999). FACTS kontrolörleri iletim sistemlerinin güç transfer kapasitesini arttırmak ve tanımlanan iletim hattı üzerinde güç akışını kontrol etmektedir (Hasanoviç, 2010).

Güç sistemlerinde oluşan bu tür sorunların çözümünde temel olarak SSSC, Statik Senkron Kompansatör (STATCOM), Statik Var Kompansatör (SVC), Tristör Kontrollü Seri Kompansatör (TCSC), Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) gibi FACTS denetleyicileri kullanılır. Literatürde yapılan çalışmalarda SSSC içeren bir güç sisteminde, SSSC'nin kontrolü için farklı yöntemler kullanılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda, SSSC'li bir güç sisteminin kontrolü klasik kontrol sistemleri olan PI, PD, PID kontrolörler, PSS (Power System Stabilizer) , Fuzzy ve Neuro-Fuzzy yöntemleri kullanılarak sistemin kontrolü sağlanmıştır (Kumar vd., 2012).

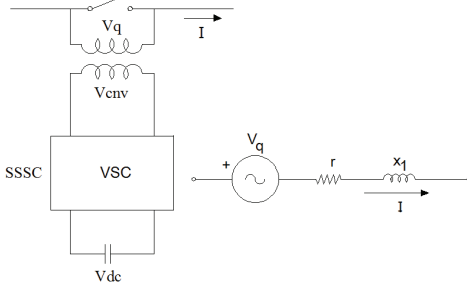
Bu çalışmada, sonsuz baraya bağlı bir makineli güç sisteminde ortaya çıkan salınımların SSSC tabanlı kaskad kontrolör kullanılarak sönmelenmesine çalışılmıştır. Çalışmamızdaki kaskad kontrol sisteminde iç döngüsünde PI kontrolörü dış döngüsünde ise PID kontrolörleri kullanılarak güç sisteminin kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Kaskad kontrol sisteminin iç ve dış yapısında kullanılan kontrolörlerin ayar parametreleri GA yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çalışmada, optimize edilmiş olan değerler ile önerilen kaskad kontrolör, SSSC için salınım sönmleme kontrolörü (Panda vd., 2010) ve klasik PID kontrol (Swain vd., 2012) ile yapılan tasarım metotları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kaskad kontrolör, SSSC için salınım sönmleme kontrolörü ve klasik PID kontrol tasarım sistemleri ile hafif yük, normal yük ve ağır yük

şartları altında karşılaştırılmıştır. Tasarım metodları ile elde edilen grafikler karşılaştırılarak sonuç kısmında değerlendirilerek yorumlanmıştır.

Materyal ve yöntem

Statik senkron seri kompensatör

SSSC bir Gerilim Kaynağı Dönüştürücünden (Voltage Source Converter-VSC) ve doğru akım enerji kaynağından oluşmaktadır. SSSC güç sistemine seri bağlanan bir facts denetleyicisidir. Statik Senkron Seri Kompensatörün (Static Synchronous Series Compensator-SSSC) Statik oluşu devreye kapasitör/reaktör ilave çıkarması olmadığını, senkron oluşu enjekte geriliminin hat akımıyla aynı faz açısında olduğunu, seri oluşu kendisinin dolayısıyla enjekte ettiği gerilimin devreye seri olduğunu ifade eder (Hingorani ve Gyugyi, 1999). Şekil 1'de SSSC' nin temel yapısı ve eşdeğer devresi verilmiştir.

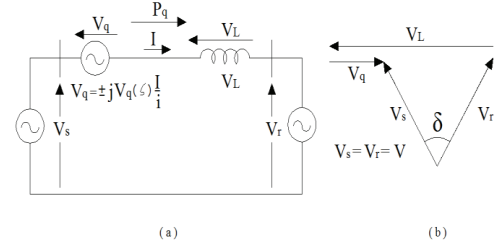


Şekil 1. (a) SSSC' nin temel yapısı , (b) SSSC' nin eşdeğer devresi

Statik Senkron Seri Kapasitör güç sistemindeki aktif ve reaktif güç kontrolünü sağlamak amacıyla tercih edilir. SSSC güç sistemine uygun faz açısında gerilim enjekte ederek iletim hattının etkin empedansını değiştirir. Sistemde reaktif güç kontrolü gerilim genlik değerine bağlı olarak gerçekleştirilir. Aktif güç kontrolü ise açı genlik değerine göre yapılmaktadır. Eğer, SSSC ile iletim hattına eklenen gerilim, güç sisteminden akan akım ile aynı fazda olursa

iletim hattı ile aktif güç alışverişinde bulunur. İletim hattına enjekte edilen gerilim, güç sisteminden akan akım ile arasında 90° faz farkı (ileride-geride) var ise SSSC ile güç sistemi arasında reaktif güç alışverişi olur.

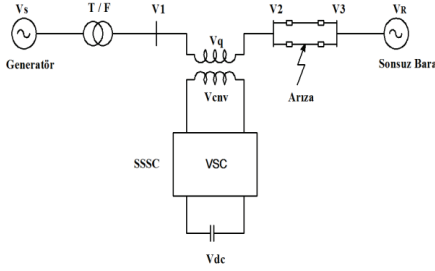
Güç sisteminde akan akımdan 90° geride bir gerilim güç sistemine seri olarak eklenirse SSSC kapasitif etki gösterir. Kapasitif durumda çıkış gerilimi akımdan 90° geri fazdadır. SSSC kapasitif çalışma durumunda sistemin etkin empedansı azalır, hat akımı ve güç sistemine iletilen aktif güç artar. SSSC temel yapısının devre şeması ve fazör diyagramı Şekil 2 ile gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) SSSC' li güç sistemi devre şeması, (b) gerilime ait fazör diyagramı

Endüktif durumda ise çıkış gerilimi akımdan 90° ileri fazda yer alır. SSSC' nin endüktif çalıştığı durumda ise sistemin hat empedansını arttırıcı yönde etki ederek endüktif hat empedansının gerilimini azaltır ve güç sistemine aktarılan aktif güç azalmış olur (Dirik, 2006; Hingorani ve Gyugyi, 1999; Padiyar, 2007).

Bu çalışmada tek makineli bir sistemin sonsuz baraya bağlı SSSC'li güç sistemi üzerinde çalışılmıştır. SSSC içeren sonsuz baraya bağlı bir makineli güç sisteminin paralel iletim hattının orta noktasında kısa devre arızası oluşmaktadır. SSSC'li güç sistemi ve arızalı durumunun gösterimi Şekil 3 ile verilmiştir.



Şekil 3. SSSC içeren sonsuz baraya bağlı bir makineli güç sistemi

Kaskad kontrol

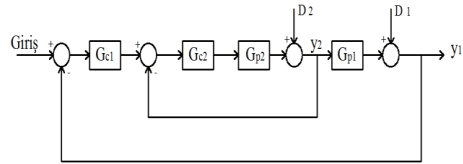
Güç sistemlerine bir bozucu etki ettiğinde oluşan salınımların mümkün olan en kısa zamanda ortadan kaldırılması istenir (Yıkan, 2005). Geri beslemeli klasik kontrol sistemlerinin yapılarındaki kontrolü sağlanan değişken referans değerden sapmadığı müddetçe bozucular için kontrol hareketi gerçekleşmemektedir (Kaya vd., 2007). Güçlü bozucular karşısında uzun zaman gecikmeli ve standart geri beslemeli kontrol sistemleri iyi performans verememektedirler (Kaya, 2001). Kaskad kontrol, özellikle öngörülme bozucularının varlığında, bir kontrol sisteminin performansını arttırmak için klasik tek geri-beslemeli kontrol sistemlerinin bir alternatifidir. Klasik sistemler bozucular karşısında iyi cevap veremeyebilirler (Kaya ve Nalbantoğlu, 2013).

Kaskad kontrol sistemler için optimum kontrolör tasarımı, kaskad kontrol sistemlerin bozucuları yok etmede klasik kontrol sistemlere göre çok daha iyi performans verdiği genetik algoritma yöntemi kullanılarak benzetim örnekleri ile gösterilmiştir. Literatürde kaskad kontrol sistemlerinin ayarı ile ilgili çok az metot vardır (Erdoğan, 2011). Kaskad kontrol yapısı endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Kaskad kontrol yapısının endüstriyel uygulamalarda kullanılma nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İç döngüde oluşan bir bozucu etkisini iç döngüde bulunan ikincil denetleyici, kontrol edilen değişkenin etkilenmemesini sağlayarak yok eder.

- Sisteme gelen bozucuları daha hızlı bir şekilde yok etmesi ve sistemin dinamik performansını arttırması.
- İç döngüde bulunan ikincil denetleyici, iç döngüde bulunan süreç transfer fonksiyonunda oluşan parametre değişimlerini düzeltebilmektedir.
- Zaman gecikmesinden kaynaklanan etkileri azaltması, sayılabilir (Nalbantoğlu ve Kaya, 2014).

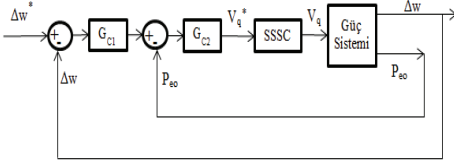
Kaskad kontrol sistemlerinde birincil denetleyici (G_{c1}) iç döngüdeki kararlılığı için kullanılır. İkincil denetleyici (G_{c2}) ise dış döngüdeki kararlılığı sağlamaktadır (Kaya ve Atherton, 2005). Kaskad kontrol sisteminde, ikincil bir ölçüm noktası mevcut ise iç döngüde kullanılacak ikincil bir denetleyici (G_{c2}) ile sistemin kapalı çevrim cevabı bozucu sinyaller için iyileştirilebilir. Kaskad kontrol sistem yapısı Şekil 4 ile verilmiştir. Sisteme gelen bozucular Şekil 4'te D_1 ve D_2 ile ifade edilmiştir (Kaya vd., 2005). Kaskad kontrol sisteminde, dış döngü geri beslemesi (y_1) ile sistemin ölçülen hız sapması ($\Delta\omega$), iç döngünün geri beslemesi (y_2) ile sistemin ölçülen güç sapması (ΔP_{eo}) alınmıştır.



Şekil 4. Kaskad kontrol sistemi

Şekil 5 ile kaskad kontrol yapısı, SSSC ve güç sistemi açık gösterimi verilmiştir. Kaskad kontrol bloğunun dış döngüsünde bulunan PID kontrolörün girişine senkron generatör rotor hız sapması gelmektedir. Dış döngüdeki kontrolörün çıkışında elde edilen işaret güç sapmasının farkı alınarak kaskad kontrol yapının iç döngüsünde bulunan PI kontrolörün girişine verilerek kaskad kontrol sisteminin çıkışında SSSC'nin güç sistemine enjekte edeceği gerilim (V_{qref}) gerilimi elde edilecek

SSSC'nin girişine aktarılır. SSSC ise girişine gelen V_{qref}^* değerine yakın bir V_q değerini üretirek güç sistemine enjekte eder.



Şekil 5. Kaskad kontrol yapı, SSSC ve güç sistemi gösterimi

Kaskad kontrol sisteminde bulunan denetleyicilerin parametre değerleri içten dış doğru bir yöntem izlenerek bulunur. Öncelikle kaskad kontrol sisteminde bulunan iç döngüdeki denetleyicinin parametre değerleri belirlendikten sonra bulunan parametre değerleri iç döngüde yerine yerleştirilip dış döngüdeki denetleyici parametreleri elde edilir. Bu şekilde elde edilen parametreler ile sistem performansı geliştirilir (Kaya ve Nalbantoğlu, 2015).

Bir kaskad kontrol sisteminin stratejisi, iç döngüde var olan bozucuları yok ederek daha iyi bir başarı sağlamak için kullanılabilir (Lee ve Park, 1998). Kaskad kontrol sistemi PI-P (dış döngü PI ve iç döngü P) ve PID-PID (dış döngü PID ve iç döngü PID) kontrolörlerini aynı anda hem iç hem de dış döngü için ayarlamayı sağlayan yöntem geliştirilmiştir. Bu metod diğer metotlardan dahi iyi bir performans vermektedir. Bu metotta P-PI ve PID-PID kontrolörlerini aynı anda hem iç hem de dış döngüde ayarlaması için GA yöntemi kullanılmıştır. Bu metod, özellikle kullanıcı tarafından performans kriterlerini seçme avantajına sahiptir. GA'nın yerel optimuma yakalanmadan, birden çok optimum nokta bularak bu optimum noktalar üzerinde çalışarak en iyi sonucu tespit etmede çok etkili olduğu kanıtlanmıştır (Lee ve Park, 1998). Önerilen tasarım metodunda kaskad kontrol yapısının iç döngüsünde G_{c2} kontrolörü olarak bir PI kontrolörü, dış döngüde bulunan G_{c1} kontrolörü

olarak bir PID kontrolörü yerleştirilerek önerilen metod tasarlanmıştır. Bu çalışmada, kaskad kontrol sistemin ayar parametreleri, kontrol uygulamalarında sıklıkla kullanılan optimal yaklaşımda, IAE (Integral of Absolute Error) kullanılarak hata sinyalini minimum yapacak, optimum kontrolör ayar parametreleri belirlenmeye çalışılır.

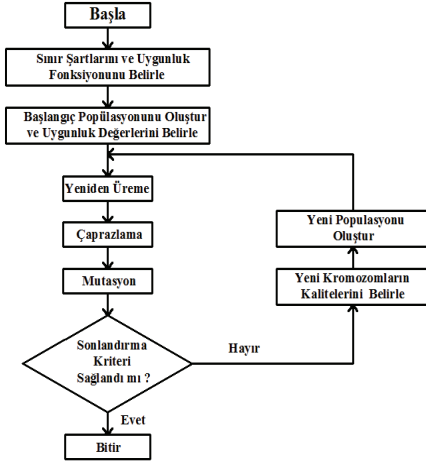
Genetik algoritma

Genetik algoritmalar, Darwin'in evrim kuramını örnek alan bir arama yöntemi olarak tanımlanabilir. Doğanın zorlayıcı koşullarına uyum sağlayabilen bireylerin yaşamlarını sürdürmesi ve yaşayan bireyler arasında seçilenlerin çiftleşerek yeni bireyler meydana getirmeleri genetik algoritmanın temelini oluşturur (Holland, 1975). GA'lar gerçek yaşamdaki doğal seçim ve doğal kalıtım kurallarına dayanır. Doğal seçim, çevre koşullarına uyum sağlamış olan canlıların yaşamlarını sürdürmesi, uyum sağlayamamış olanların ise elenmesi yani ölmesi anlamına gelir. Doğal kalıtım ise, seçilmiş olan bireylerin birbirleri ile çiftleşerek yeni yavrular meydana getirmesi olarak kısaca özetlenebilir (Erdoğan, 2011).

GA, olası çözümlerden (kromozomlardan) oluşan rastgele başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlar. Kromozomlar belli sınırlar içerisinde belirlenirler ve daha önceden belirlenen bir amaç fonksiyonundan elde edilen uygunluk değerlerine göre değerlendirilirler. Seçim yöntemi ile en iyi uygunluk değerine sahip kromozomların (ebeveynlerin) seçilmesi sağlanır. Seçim operatörü ile belirlenen iki ebeveyne çaprazlama operatörü uygulanır. İki ebeveynin genetik bilgisinin değiştirilmesiyle çaprazlama operatörü uygulanmış olur ve yeni bir çocuk birey elde edilir. Çaprazlama işleminden sonra birey mutasyona uğratılır.

Mutasyonun amacı ise ebeveynlerden oluşan yeni bireylerin farklılığını artırarak uygunluk fonksiyonu ile olan uyumun bir önceki jenerasyonla aynı olmasını engellemektir. Elde edilen yeni olası çözümlerin kaliteleri istenen değerlere ulaşana ya da istenilen sonlandırma

kriteri sağlanana dek bu değerlendirme ve yeni popülasyon oluşturma işlemi devam eder (Bağış ve Özçelik, 2007). Şekil 6'da GA'nın akış şeması verilmiştir.



Şekil 6. Genetik algoritmanın genel akış şeması

Çalışmamızda kaskad kontrolör yapısında kullanılan PI ve PID kontrolörlerin ayar parametreleri, kontrol uygulamalarında sıklıkla kullanılan genetik algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Optimal yaklaşımda IAE (Integral of Absolute Error) kullanılarak hata sinyalini minimum yapacak optimum kontrolör ayar parametreleri belirlenmeye çalışıldı. Hata sinyali olarak hız sapması (Δw) alınmıştır. Uygunluk fonksiyonu aşağıdaki denklemdeki gibi belirlendi.

$$IAE = \int_0^t |\Delta w(t)| dt \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{1 + \alpha \cdot IAE} \quad (2)$$

Denklemden f uygunluk fonksiyonunda α çarpanı 0,1 alınmıştır. Kullanılan algoritmada çaprazlama oranı (crossover rate) 0,8 olarak, mutasyon oranı (mutation rate) 0,1 olarak ve nüfus büyüklüğü (population size) 20 olarak seçildi. Ayrıca, örneğimiz için 100 nesil için araştırma yapılmıştır.

Klasik kontrol sistemi

Kontrol sistemlerinin varoluş gerekçesi, sistemin girişte verilen sinyali en kısa sürede yakalaması; yani hızlı cevap vermesi ve bu cevap sinyali olan çıkışın da mümkün olduğu kadar az bozulmaya uğramasıdır. İdealde hatanın sıfır yapılmak istenmesine karşın gerçek hayatta sistemlere etki eden birçok durumun etkisini minimuma indirmek kontrolün amaçları arasındadır. İşte bu durumda PID kontrolör yapıları bize sistemin en iyi çalışma koşullarını elde etmede büyük kolaylıklar sunmaktadır (Tan, 2001; Ho vd., 1996).

PI (oransal+ integral) kontrolör yapısı, bir kontrolör yapısında I kontrolör kullanıldığında kalıcı hal hatası azalır ya da elimine edilir. Lakin integratörün sönüme kötü etkisi de olabilmektedir. Sistemin derecesini bir arttırmaktadır. PI kontrol edici birinci dereceden doğrusal zamanla değişmeyen sistemler için optimum bir çözüm sunmaktadır (Yıkan, 2005). PID kontrol ediciler şuan endüstride en çok kullanılan otomatik geri beslemeli kontrol cihazlarının çoğunluğunda kullanılmaktadır.

PID kontrol edici de ikinci dereceden doğrusal zaman gecikmesi içermeyen sistemler için optimum çözüm sunmaktadır.

PI kontrolör için:

$$U = K_i \cdot e + K_i * T_i \int e dt \quad (3)$$

$$C(s) = K_i + \frac{K_i * T_i}{s} \quad (4)$$

PID kontrolör için:

$$U = K_o \cdot e + K_o * T_o \int e dt + K_o * K_{do} \frac{de}{dt} \quad (5)$$

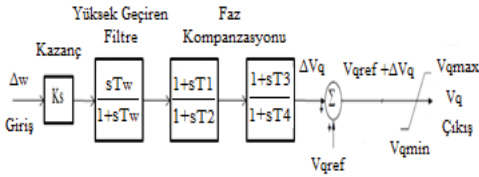
$$C(s) = K_o + \frac{K_o * T_o}{s} + K_o * K_{do} \cdot s = K_o \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \quad (6)$$

$C(s)$, kontrol sisteminin kontrolörü olarak tanımlanır. Burada $T_i = \frac{K_o}{K_o * T_o}$ ve $T_D = \frac{K_o * K_{do}}{K_o}$ şeklinde hesaplanabilecek PID parametrelerinin diğer bir gösterimidir (Erdoğan, 2011).

SSSC için sönümleme kontrolör yapısı

Güç sistemleri karışık nonlineer sistemlerdir ve sık sık yetersiz sönümleme nedeniyle düşük frekanslı güç salınımları oluştururlar. Bazen de düşük frekans ve küçük genlikteki bu salınımlar uzun bir zaman periyodu için mevcuttur ve güç transfer kapasitesinde azalmaya sebep olurlar. SSSC için sönümleme kontrolörü Şekil 7 ile verilmiştir. SSSC için sönümleme kontrolü V_q sistem salınımlarının söndürmek için modüle edilir. Güç sistemi osilasyon sönümünü sağlar. SSSC için sönümlüme kontrolünün giriş sinyali olarak hız sapması kullanılır, çıkışı sinyali olarak da kontrolör tarafından sağlanan sönüm kontrol sinyalini kullanılır. Diğer kontrolör parametreleri kontrol sistemleri konularında yer alan ileri-geri (lead-lag) yapılarının parametreleridir. SSSC için sönümleme kontrolü sönümleme kontrolörü yapı kazancı, yüksek geçiren filtre ve Faz kompanzasyonu bloklarından meydana gelir (Padiyar, 2008).

Bu blok girişine gelen hız sapması sinyali kazanç yardımıyla kuvvetlendirilir. Kuvvetlendirilen sinyal yüksek geçiren filtreden geçirilerek DC bileşenleri süzer. Bu kısmın eksikliği durumunda meydana gelebilecek kalıcı değişiklikler generatörün çıkış gerilimini etkiler (Bal, 2012). Yüksek geçiren filtreden sonra da faz kompanzasyonu gelir. Faz kompanzasyonunda T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 zaman sabitleri olup hız sensörlerinin ve uyarma sistemlerinin çalışmasındaki zaman gecikmesinin sistem üzerindeki etkisini gidermek için faz kompanzasyonu yapılır. Oluşan ΔV_q , güç sistemine enjekte edilen V_{qref} ile toplanıp çıkışında enjekte gerilimi V_q oluşturularak salınımları söndürmek için modüle edilmiş olur (Ağın, 2013).



Şekil 7. SSSC için sönümleme kontrolörü

Uygulama ve başarımlar

Önerilen kaskad kontrolör, SSSC için sönümleme kontrolörü (Panda vd., 2010) ve klasik PID kontrol (Swain vd., 2012) devre yapıları SSSC içeren sensuz baraya bağlı tek makinalı güç sisteminden oluşmaktadır. Önerilen kaskad kontrolör, klasik PID kontrol sistemi ve SSSC için salınım sönümleme kontrolörünün iletim sistemlerinin benzetimi MATLAB / Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Önerilen kaskad kontrolör, klasik PID kontrol ve SSSC için sönümleme kontrolünün paralel iletim hattının orta noktasında kısa devre arızası meydana gelmektedir. İletim sistemindeki arızanın $t=1s$ anında oluştuğu ve bu arızanın 0.1s sürdüğü varsayılmaktadır. Önerilen kaskad kontrol sistemin iç yapısında PI kontrolör ve dış yapısında ise PID kontrolörler kullanılmıştır. Kullanılan bu kontrolörlerin parametre değerleri GA yöntemiyle belirlenmiştir. Hafif yük durumu altında, GA ile belirlenen parametre değerleri normal yük ve ağır yük durumları için de aynı parametre değerleri seçilmiştir. GA kullanılarak optimize edilen parametre değerleri ve değişim aralıkları *Tablo 1*'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Optimize edilen parametre değerleri ve değişim aralığı

Parametre		Normal, hafif ve ağır yük durumu için en iyi değer	Min.	Max.
Dış Döngü	K_o	646,0940	10	2000
	T_o	0,0015	0,0001	20
	K_{do}	300	0,001	300
İç Döngü	K_i	6,0030	1	300
	T_i	4,3662	0,01	15

SSSC için sönümleme kontrolöründe kullanılan parametre değerleri *Tablo 2* ile verilmiştir ve kullanılan parametre değerleri Panda ve diğerleri (2010), çalışmasında kullanılan parametre değerleri ile aynı seçilmiştir. Bu çalışmada kontrolörün parametre değerleri reel kodlu genetik algoritma yöntemi ile optimize

edilmiştir. Tüm yük durumlarında aynı parametre değerleri kullanılmıştır.

Tablo 2. SSSC için sönümleme kontrollü sisteminin parametre değerleri

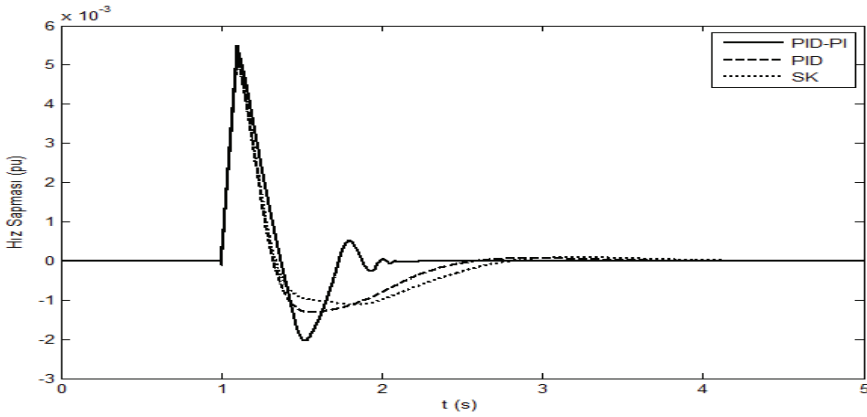
Parametreler	Ayar Parametreleri
K_S	73.4011
T_W	10
T_1	0.3363
T_2	0.2251
T_3	0.6443
T_4	0.7227

Klasik PID kontrol sisteminde kullanılan parametre değerleri *Tablo 3*'te belirtilmiştir ve kullanılan parametre değerleri Swain ve diğerleri (2012), çalışmasında kullanılan parametre değerleri ile aynı seçilmiştir. PID kontrolörünün parametre değerleri her yük durumu için ayrı ayrı diferansiyel evrim algoritma yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

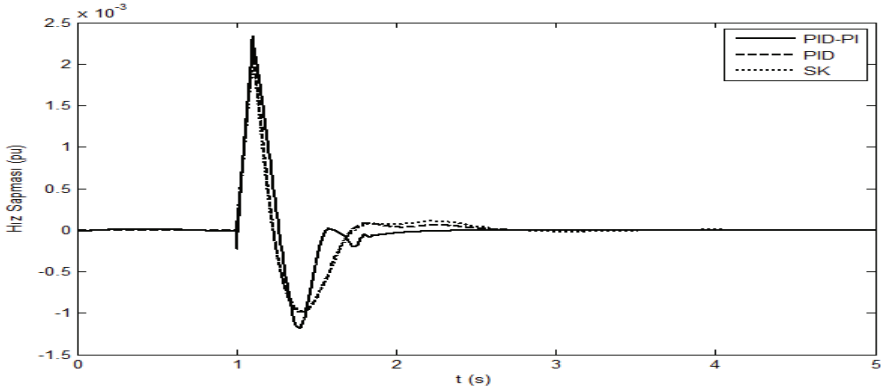
Tablo 3. PID kontrol sisteminin parametre değerleri

Parametreler	Ayar Parametreleri		
	Normal Yük	Hafif Yük	Ağır Yük
K_P	65,6148	100	74,9405
K_I	0,01	1,3034	0,7341
K_D	1	1	0,9326

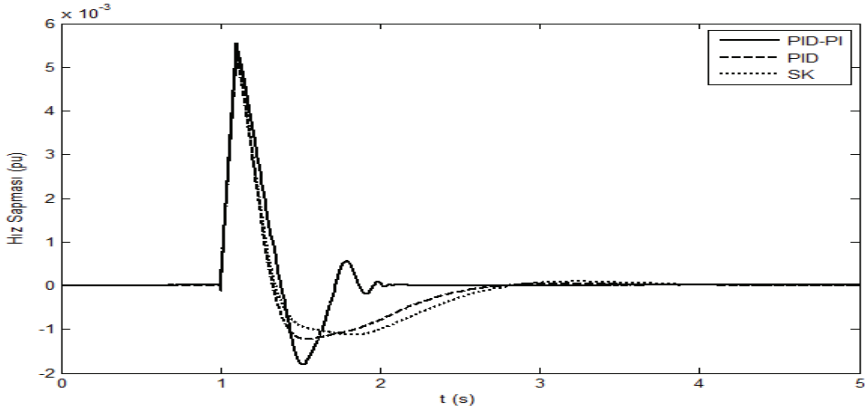
Önerilen kaskad kontrolör ile karşılaştırılan sistemler hafif yük, normal yük ve ağır yük şartları altında çalıştırılıp birbiri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kaskad kontrolör PID-PI, klasik PID kontrol sistemi PID ve SSSC için salınım sönümleme de SK ile grafiklerde belirtilmiştir. Normal yük durumu için, elde edilen rotor hız sapmasının ($\Delta\omega$) simülasyon sonuçları Şekil 8 ile verilmiştir. Hafif yük durumu için, elde edilen rotor hız sapması ($\Delta\omega$) simülasyon sonuçları Şekil 9 ile verilmiştir. Ağır yük durumu için, elde edilen rotor hız sapmaları ($\Delta\omega$) simülasyon sonuçları Şekil 10 ile verilmiştir.



Şekil 8. Normal yük durumu ($P_{ref}=0.75 p.u$) için rotor hız sapmalarının karşılaştırılması



Şekil 9. Hafif yük durumu ($P_{ref}=0.3$ p.u) için rotor hız sapmalarının karşılaştırılması



Şekil 10. Ağır yük durumu ($P_{ref}=1$ p.u) için rotor hız sapmalarının karşılaştırılması

Şekil 8'de, önerilen kaskad kontrolör (PID-PI) normal yük durumu için karşılaştırılan klasik PID ve SSSC için salınım sönümlenme kontrollü sistemlerine göre hız sapmasının daha az olduğu ve rotor hızının referans hıza daha kısa sürede oturduğu görülmektedir.

Şekil 9'da, önerilen kaskad kontrolör (PID-PI) hafif yük durumu için karşılaştırılan klasik PID ve SSSC için salınım sönümlenme kontrollü sistemlerine göre hız sapmasının daha az olduğu ve rotor hızının referans hıza daha kısa sürede oturduğu görülmektedir.

Şekil 10'da, ağır yük durumu altında önerilen kaskad kontrolörün, klasik PID ve SSSC için

sönümlenme kontrol sistemlerine göre rotor hız sapmasının daha az olduğu, sistemin kısa sürede ve kararlı bir şekilde oturduğu görülmektedir. Önerilen kaskad kontrolörün ağır yük durumu için hız sapmasının verdiği cevap diğer kontrol sistemlerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Önerilen kaskad kontrolör ve diğer sistemlerin IAE (Mutlak Hatanın İntegrali) performansları *Tablo 4* ile özetlenmiştir. Önerilen kaskad kontrolörün hata sinyali değerinin diğer sistemlerin hata sinyal değerlerine göre daha az olduğu ve önerilen sistemin performansının daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Önerilen kaskad kontrolör ile diğer sistemlerin IAE performansı

	IAE		
	Normal Yük	Hafif Yük	Ağır Yük
PID-PI	0,00154	0,00054	0,00156
PID	0,00179	0,00058	0,00181
SK	0,00191	0,00060	0,00198

Uyarma sistemi: $T_{LP} = 0.02$ s, $K_a = 200$, $T_a = 0.001$ s, $K_e = 1$, $T_e = 0$, $T_b = 0$, $T_c = 0$, $K_f = 0.001$, $T_f = 0.1$ s, $E_{fmin} = 0$, $E_{fmax} = 7$, $K_p = 0$

SSSC: $S_{nom} = 100$ MVA, $V_{nom} = 500$ kV, $f = 60$ Hz, $V_{qref} = 3$ pu/s, Konverter empedansı: $R = 0.00533$, $L = 0.16$, $V_{DC} = 40$ kV, $C_{DC} = 375 \times 10^{-6}$ F, Enjekte gerilim regülatör kazançları: $K_p = 0.00375$, $K_i = 0.1875$, DC gerilim regülatör kazançları: $K_p = 0.1 \times 10^{-3}$, $K_i = 20 \times 10^{-3}$, Enjekte gerilim büyüklüğünün limiti: $V_q = \pm 0.2$

Sonuç

Bu çalışmada, önerilen kaskad kontrolör klasik PID kontrol sistemi ve SSSC için sönmüleme kontrollü sistemlerinden daha iyi performans verdiği görülmektedir. Önerilen kaskad kontrolörün rotor hız sapmalarının normal yük, hafif yük ve ağır yük durumlarında güç sistemine verilen cevapların daha iyi olduğu görülmektedir. Önerilen kaskad kontrolörünün karşılaştırılan kontrol sistemlerine göre normal, hafif ve ağır yük durumlarında hız sapmalarının daha az olduğu görülmektedir ve sistemin kararlı ve daha kısa sürede oturduğu görülmektedir.

Ekler:

Tek makineli sonsuz baralı güç sistemi parametreleri;

Generator:

$S_n = 2100$ MVA, $H = 3.7$ s, $V_n = 13.8$ kV, $f = 60$ Hz, $R_s = 2.8544e-3$, $X_d = 1.305$, $X_d' = 0.296$, $X_d'' = 0.252$, $X_q = 0.474$, $X_q' = 0.243$, $X_q'' = 0.18$, $T_d' = 1.01$ s, $T_d'' = 0.053$ s, $T_{qo}'' = 0.1$ s.

Yük: 250MW

Transformatör: $S_n = 2100$ MVA, $f = 60$ Hz
 $V_1/V_2 = 13.8/500$ kV, $R_1 = R_2 = 0.002$, $L_1 = 0$,
 $L_2 = 0.12$, DI/Yg connection, $R_m = 500$, $L_m = 500$
İletim Hattı: 3-faz, 60 Hz, Uzunluk = 300 km,
 $R_l = 0.02546$ Ω / km, $R_0 = 0.3864$ Ω / km, $L_l = 0.9337e-3$ H/km, $L_0 = 4.1264e-3$ H/ km, $C_l = 12.74e-9$ F/ km, $C_0 = 7.751e-9$ F/ km

Hidrolik Türbin ve Regülatör: $K_a = 3.33$, $T_a = 0.07$, $G_{min} = 0.01$, $G_{max} = 0.97518$, $V_{gmin} = -0.1$ pu/s, $V_{gmax} = 0.1$ pu/s, $R_p = 0.05$, $K_p = 1.163$, $K_i = 0.105$, $K_d = 0$, $T_d = 0.01$ s, $\beta = 0$, $T_w = 2.67$ s

Kaynaklar

- Ağın A., (2013). Enerji sistemleri kararlılığı ve güç sistemi dengeleyicisi uygulamaları, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bağış, A., Özçelik Y., (2007). Gerçek Kodlu Genetik Algoritma Kullanılarak Sistem Kimliklendirme, 12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi, Eskişehir.
- Bal, E., (2012). Gerilim kontrolünde güç sistemleri kararlı kılıcı uygulamaları ve alternatifleri, Yüksek lisans tezi, İÜ Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dirik, H., (2006). Statcom ve SSSC Denetleyicilerinin Akıllı Algoritma Tabanlı Kayan Kipli Kontrolörü, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Eminoğlu, U., (2003). Facts Elemanları Kullanılan Güç Akış Sistemlerinin İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Erdoğan, M.A., (2011). Genetik Algoritma Yöntemi ile Kaskad Sistemler için Optimum Kontrolör Seçimi, Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır
- Hasanović, A., (2000). Modeling and Control of the Unified Power Flow Controller (UPFC), Master's thesis, West Virginia University.
- Hingorani, N.G., Gyugyi, L., (1999). Understanding Facts: Concepts and Technology Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, New York, 209-261.
- Ho, M.T., Datta, A., Bhattacharyya, S., (1996). A new approach to feedback stabilization, Proc. Of the 35th CDC, pp. 4643-4648.
- Holland, J.H., (1975). Adaptation in Natural and Artificial System, Ann Arbor, the University of Michigan Press, USA.
- Kaya, İ., (2001). Improving Performance Using Cascade Control and Smith Predictor, ISA Trans., 223-234.

- Kaya, İ., Atherton, D.P., (2005). Improved Cascade Control Structure for Controlling Unstable and Integrating Processes, Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, ISSN: 0191-2216, 7133-7138.
- Kaya, İ., Nalbantoğlu, M., (2013). Genetik Algoritma ile Eşzamanlı Kaskad Denetleyicisi Tasarımı, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK 2013, Malatya,879-882.
- Kaya, İ., Nalbantoğlu, M., (2015). Cascade Controller Design Using Controller Synthesis, 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 32-36.
- Kaya, İ., Tan, N., Atherton, D.P., (2005). Improved Cascade Control Structure and Controller Design, Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and the European Conference, ISSN: 0191-2216, 3055-3060.
- Kaya, İ., Tan, N., Atherton, D.P., (2007). Improved Cascade Control Structure for Enhanced Performance, *J. Process Control*, Cilt: 17, 3-16.
- Kaya, K., (2006). Esnek Alternatif Akım Sistemleri Kontrollerinin İncelenmesi ve Şebeke Üzerindeki Etkileri, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Köse, E., (2012). Gerilim Kararlılığı İyileştiricilerinin Akıllı Algoritma Tabanlı Kayan Kipli Kontrolü, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kumar, S.A., Easwarlal, C., Kumar, M. S., (2012). Power System Stability Enhancement using Adaptive Neuro-Fuzzy Tuned Static Synchronous Series Compensator (SSSC). *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* ISSN: 2249 – 8958, Volume-1, Issue-4, April.
- Lee Y., Park S., (1998). PID controller tuning to obtain desired closed loop responses for cascade control system, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol.37, pp.1859-1865.
- Mathur, R.M., Varma, R.K., (2002). Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, John Wiley & Sons, Incorporated, IEEE Press Series on Power Engineering.
- Nalbantoğlu, M., Kaya, İ., (2014). Geliştirilmiş Kaskad Denetim Yapısının Genetik Algoritma ile Eşzamanlı Tasarımı, TOK 2014 Bildiri Kitabı 11-13 Eylül 2014, Kocaeli, 248-251.
- Panda, S., Swain, S.C., Rautray, P.K., Malik, R.K., Panda, G., (2010). Design and analysis of SSSC-based supplementary damping controller, *Simulation Modelling Practice and Theory* 18 1199–1213.
- Panda, S., (2010). Modelling, simulation and optimal tuning of SSSC-based controller in a multi machine power system, ISSN 1 746-7233, England, UK *World Journal of Modelling and Simulation* Vol. 6 No. 2, pp. 110-121.
- Padiyar, K.R., (2007). Facts Controllers In Power Transmission and Distribution, New Age International, 217-243.
- Padiyar, K.R., (2008). Power System Dynamics Stability and Control, Anshan Limited, Yeni Delhi 81-7800-186-1.
- Song Y.H., Johns, A.T., (1999). Flexible AC Transmission Systems (FACTS), IEE Publication Series, 237-242.
- Swain, S.C., Mahapatra, S., Panda, S., Panda, S., (2012). Design of DE Optimized SSSC-Based FACTS Controller, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Volume 2 Issue 4, ISSN: 2277-7040, 12-27.
- Tan, N. , (2001). Computation of stabilizing PI and PID controllers for process with time delay, to appear in ISA Transactions.
- Yıkan, F. , (2005). Dayanıklı PID Kontrolör Tasarım Metodlarının Araştırılması ve Geliştirilmesi, Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Improvement of power system stability with by SSSC-based cascade control

Extended abstract

In control systems, when a destructive comes to the system, it is necessary for the system to show a good performance towards that destructive. Being an alternative to conventional control system, Cascade Control increases the performance of the control system especially when there is an unpredictable destructive. In this study, the control of the system is ensured with Cascade Control structure over single machined power system connected to infinite bus bar including SSSC (Static Synchronous Series Compensator). SSSC is a FACTS (Flexible AC transmission systems) controller that is connected in series to the power system. FACTS controllers can be used in controlling power flow and improving temporary and permanent stability of the systems. Also, oscillation generated in the power system can be reduced. These FACTS controllers reduce reactive power flow and consequently provide more active power flow through transmission line. By injecting voltage in an appropriate phase angle for power system, SSSC changes the effective impedance of the transmission line. SSSC is preferable in providing the active and reactive power control in the power system. Reactive power control is performed depending on the voltage amplitude value of the system. Active power control is performed depending on the angle amplitude value. In Cascade Control structure, conventional PID controllers are used for internal and external loop. In the cascade control structure proposed by this study, PI controller is used for the internal loop, and PID is used for the external loop. The controller parameters of the internal and external loop in cascade control structure were obtained by genetic algorithm (GA) method. GA are based on natural selection and natural inheritance rules in real life. Natural selection means the survival of organisms that have adapted to the environmental conditions, and the elimination of which is not fit, that means dying. The natural inheritance may be summarized as mating with each of the individuals selected to form new offspring. The performance of the proposed cascade controller have been compared with SSSC for damping controller and conventional PID controller performance in the literature. Conventional PID control system and PID controllers are used in the most of automatic feedback control device in the industry.

PID (proportional + integral + differential) control agents in the second degree offers the optimum solution for linear time-delay-free system. SSSC for damping controller also provides power system oscillation damping. Speed deviation is used as the input signal of the SSSC for damping control, while the damping control signal provided by the controller is used as output signal. Other controller parameters are those of the lead-lag structures located in the control system issues. After the evaluation of the results obtained in this comparison, the proposed cascade controller in normal load situation showed 19% better performance compared to the SSSC for damping controller, and it showed 14% better performance compared to the conventional PID controller. Under heavy load condition, the proposed cascade controller showed 21% better performance than the SSSC for damping controller, and 14% better performance than the conventional PID controllers. In the case of light load conditions, the proposed cascade controller showed 10% better performance than SSSC for damping controller, and 7% better performance than the conventional PID controller. In addition, the proposed cascade controller has been observed to have a less speed deviation than the SSSC for damping controller and the conventional PID controllers under normal, light, and heavy load conditions. Also, it has been observed that the proposed cascade has stability and it settled in a short time.

Keywords: Power Systems, SSSC, Cascade Control, Genetic Algorithm, PID controller.