



Orijinal Makale/Research Article

Güç sistemlerinde otomatik gerilim regülatörü-sekonder gerilim kontrolü ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi

Mehmet Kenan Döşoğlu¹, Enes Kaymaz²

^{1,2}Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Güç sistemleri
Otomatik gerilim regülatörü
Sekonder gerilim kontrolü
PSAT

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 14.02.2024
Kabul Tarihi: 11.07.2024

Öz: Güç sistemlerinde geçici kararlılık esnasında sistemde oluşan bozunumların kısa sürede düzeltilmesi önemli bir konudur. Bunun için hem generatör hem de baraların koordineli bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolü kullanılarak çok makineli bir güç sisteminde küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Generatörün denetlenmesinde otomatik gerilim regülatörü kullanılırken, arızaya bağlı olarak belirlenen pilot baranın denetiminde sekonder gerilim kontrolü kullanılmaktadır. Sistemin açılma hız değişiminin yanı sıra küçük sinyal kararlılığı için de çeşitli sonuçlar irdelenmiştir. Karşılaştırmalar, otomatik gerilim regülatörü-sekonder gerilim kontrolünün kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlara göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre otomatik gerilim regülatörü-sekonder gerilim kontrolünün koordineli bir şekilde kullanılması ile sistemin daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Atıf için/To Cite:

Döşoğlu M. K. Kaymaz E. Güç sistemlerinde otomatik gerilim regülatörü-sekonder gerilim kontrolü ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 16(1), 20-26, 2024.

Investigation of small signal stability with automatic voltage regulation-secondary voltage control in power systems

Keywords

Power systems
Secondary voltage control
Automatic voltage regulator
PSAT

Article history:

Received: 14.02.2024
Accepted: 11.07.2024

Abstract: It is an important issue to correct the disturbances that occur in the system during transient stability in power systems in a short time. For this, both the generator and the buses must be controlled in a coordinated manner. In this study, small signal stability analysis in a multi-machine power system was examined using automatic voltage regulator and secondary voltage control. While automatic voltage regulator is used to control the generator, secondary voltage control is used to control the pilot bus determined depending on the fault. Various results have been examined for the small signal stability as well as the angular speed change of the system. Comparisons are made according to the situations in which automatic voltage regulator-secondary voltage control is used and not used. According to the results obtained, it has been determined that the system gives better results by using the automatic voltage regulator-secondary voltage control in a coordinated manner.

1. Giriş

Çok makineli güç sistemlerinde oluşabilecek geçici kararlılık durumlarında sistemde kullanılan parametrelerde kararsızlık ve salınımların artması gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, sistem kararlılığının sağlanması amacıyla çeşitli denetleyici modelleri tercih edilmektedir. Bu denetleyici modellerinden bir tanesi de otomatik gerilim

regülatörüdür. Otomatik gerilim regülatörünün güç sistemlerinde kullanımı ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır. Güç sistemlerinin geçici kararlılık çalışmalarında gerçekleştirilen sistem denetiminde, güç sistemi kararlı kılıcısı ile birlikte otomatik gerilim regülatörü kullanılmaktadır. Sonsuz makineli ve çok makineli güç sistemlerinde kullanılan otomatik gerilim regülatörü, sistem kararlılığını sağlamanın yanı sıra geçici durum esnasında sistemi

* İlgili yazar/Corresponding author: kenandosoglu@duzce.edu.tr

kompanze etmektedir [1,2]. Otomatik gerilim regülatörünün senkron generatörlerde diğer bir önemli kullanımı ise küçük sinyal kararlılığı analizidir. Senkron generatörde otomatik gerilim regülatörü kullanımının baskın makine, katılım faktörü, salınım durumları ve özdeğer analizlerinde kararlılık açısından etkili sonuçlar verdiği ilgili çalışmalarda görülmektedir [3,4]. Bazı durumlarda senkron generatörde güç sistemi kararlı kılıcısı ve türbin yöneticisi modellerinin kullanımı yetersiz kalabilmektedir. Özellikle de geçici kararlılık durumlarında, güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemleri ile birlikte senkron generatörü desteklemek için otomatik gerilim regülatörü tercih edilmektedir [5,6].

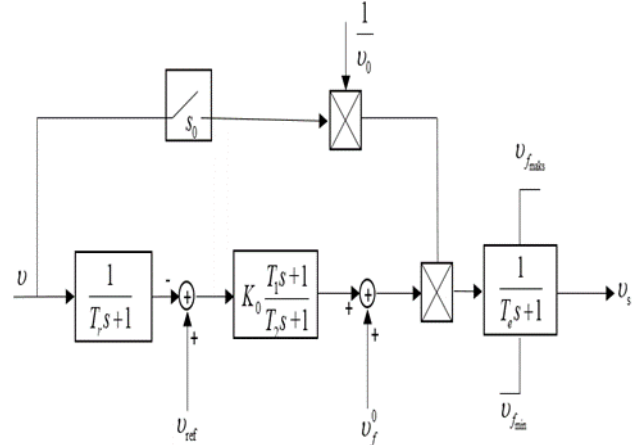
Bu çalışmada kullanılan sekonder gerilim kontrolü ise otomatik gerilim regülatörüne bağlı olarak referans olarak belirlenen pilot baranın kontrolünü gerçekleştirmektedir. Güç sistemlerinde sekonder gerilim kontrolü ile ilgili çok sayıda çalışma yer almaktadır. Güç sistemlerinin karmaşık yapısı nedeniyle, pilot baranın arıza durumlarına göre belirlenmesi için sekonder gerilim kontrolü kullanılmaktadır. Pilot baraya bağlı olarak optimum parametrelerin belirlenmesinde sekonder gerilim kontrolü etkili olmaktadır [7,8]. Otomatik gerilim regülatörünün kontrolünde kullanılan sekonder gerilim kontrolü ile gerilim ve reaktif güç kontrolü için güç sistemi kararlı kılıcısı modelleri tercih edilmektedir. Böylece, istenilen düzeyde gerilim ve reaktif güç kontrolü sağlanmaktadır [9,10]. Güç sistemlerinde ani yük değişimlerine karşı gerilim profilini düzenlemek için uygun reaktif güce ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için çok makineli güç sistemlerinde sekonder gerilim kontrolü ile birlikte senkron fazör ölçüm yöntemleri de kullanılmaktadır [11,12].

Sekonder gerilim kontrolünün geçici kararlılık durumları için kullanımının uygun olduğu yöntemlerden bir tanesi de küçük sinyal kararlılığı analizidir. Yapılan bu çalışmada, otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolü kullanılarak 3 makineli 9 baralı güç sisteminde küçük sinyal kararlılığının incelenmesi amaçlanmıştır. Çok makineli güç sisteminde otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılması ile birçok parametre küçük sinyal kararlılığı açısından detaylı olarak incelenmiştir. Her iki modelin de etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu çalışmada, Bölüm 2'de otomatik gerilim regülatörü ele alınırken, Bölüm 3'te sekonder gerilim kontrolü ve Bölüm 4'te küçük sinyal kararlılığı detaylı olarak açıklanmıştır. Bölüm 5'te benzetim çalışmasına yer verilirken, Bölüm 6'da benzetim çalışması sonuçları gösterilmiştir. Son bölümde ise sonuç kısmı irdelenmiştir.

2. Otomatik Gerilim Regülatörü

Otomatik gerilim regülatörünün çok makineli güç sistemlerinde kullanılmasının en önemli nedeni, senkron generatörü istenilen gerilim değerinde tutabilmektir. Bir geri beslemeli kontrol sistemi, sürekli olarak çıkışını güncelleyerek istenilen gerilim değeri ile karşılaştırma yapmaktadır. Karşılaştırmalarda farklılıklar var ise bir hata sinyali göndererek gerilimi değiştirmektedir. Senkron generatörlerde, 3 farklı tip otomatik gerilim regülatörü kullanılmaktadır. Bu çalışmanın analiz kısmında öncelikli olarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu yüzden, bu çalışma için otomatik gerilim regülatörü 3 modelinin belirlenmiştir. Otomatik gerilim regülatörü 3 modelinin kontrol yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir [13].



Şekil 1. Otomatik gerilim regülatörü 3 modelinin kontrol yapısı.

Otomatik Gerilim Regülatörü 3 modelinin diğer modellere göre daha kapsamlı bir kontrol yapısı bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan otomatik gerilim regülatörünün ana amacı bağlı olduğu senkron generatörü belirli bir sabit gerilimde tutmaktır. Otomatik gerilim regülatörünün içerisinde kullanılan bloklar ve transfor fonksiyonları sayesinde çıkış sürekli olarak değişir. Buna bağlı olarak ölçülen gerilim ile referans gerilimin karşılaştırması yapılır.

3. Sekonder Gerilim Kontrolü

Senkron generatörlerde denetleyici olarak kullanılan sekonder gerilim kontrolü merkezi alan ve küme kontrolünden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra çok makineli güç sisteminde belirlenen barada pilot bara uygulaması da bulunmaktadır. Hem senkron generatör hem de pilot bara kontrolü eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu kontrolde otomatik gerilim regülatörü kullanılmaktadır. Pilot baradan alınan bilgiler ise sekonder gerilim kontrolünü oluşturan merkezi alan ve küme kontrolünden geçmektedir. Geçici kararlılık esnasında, sistem kararlılığının

sağlanması amacıyla senkron generatör sekonder gerilim kontrolü vasıtasıyla uygun sinyaller gönderilmektedir. Merkezi alan ve küme kontrolünde sınırlandırıcı blokları tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra bu modellemede Oransal Integral (PI) kullanılmaktadır [14].

4. Küçük Sinyal Kararlılığı

Küçük sinyal kararlılığı analizi, çok makineli güç sistemlerinde elektromekanik salınımların çalışma modları açısından çok önemlidir. Generatörlerin bireysel olarak çalışması ve diğer gruplar halinde çalışmasında salınım durumları kontrol edilmektedir. Küçük sinyal kararlılığını sağlamak için çalışma modlarının en uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Senkron generatörlerde kullanılan denetleyicilerin sönümlenme işlemleri çalışma modlarına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bunun değerlendirilmesinde özdeğerler kullanılmaktadır. Sönümlenme ifadesinin hesaplanmasında kullanılan özdeğer (λ) ifadesi Denklem 1'de gösterilmiştir.

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (1)$$

Özdeğerler iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım, gerçek kısım (σ) sönümlenme durumunu gösterirken; ikinci kısım sanal kısım ($j\omega$) sönümlenme durumunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, özdeğer hesaplamasında salınım frekansı ve sönümlenme oranları da dikkate alınmaktadır. Salınım frekansı (ϕ) ve sönümlenme oranı (ζ) ifadeleri, Denklem 2 ve Denklem 3'te gösterilmiştir.

$$\phi = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (3)$$

Özdeğer hesaplamasında kullanılan bir diğer önemli ifade katılım faktörüdür. Sistemin frekansa göre çalışma modlarının belirlenmesinde katılım faktörü kullanılmaktadır. Özellikle de yerel alan ve bölgeler arası çalışma modlarında sistemde kullanılan özvektörlerin ne kadarlık kısımda katkı yaptığını göstermektedir [15,16].

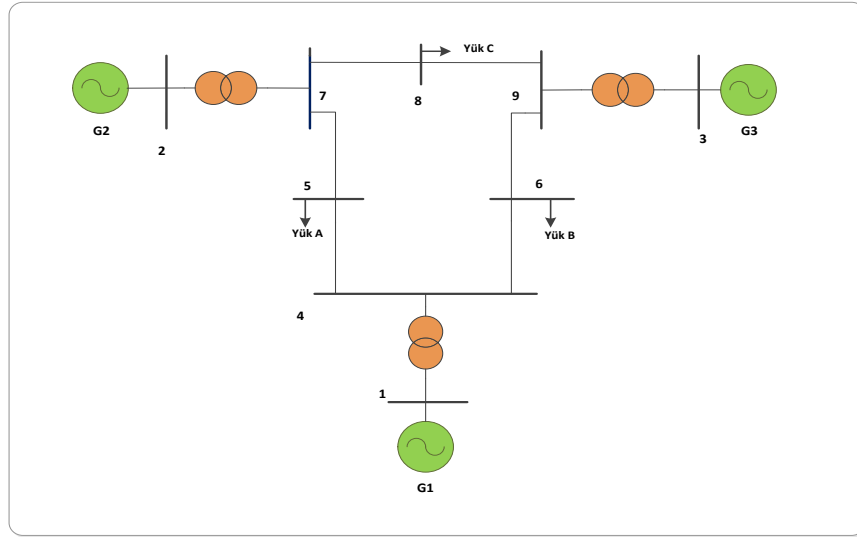
5. Benzetim Çalışması

Bu çalışmada analizi yapılan 3 makineli 9 baralı sistem Şekil 2'de gösterilmiştir [17]. Bu test sisteminde 1 numaralı bara salınım barası, 2 ve 3 numaralı baralar generatör barası olarak kullanılırken, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı baralar yük barası olarak kullanılmıştır. Sistemde otomatik gerilim regülatörü generatörlere

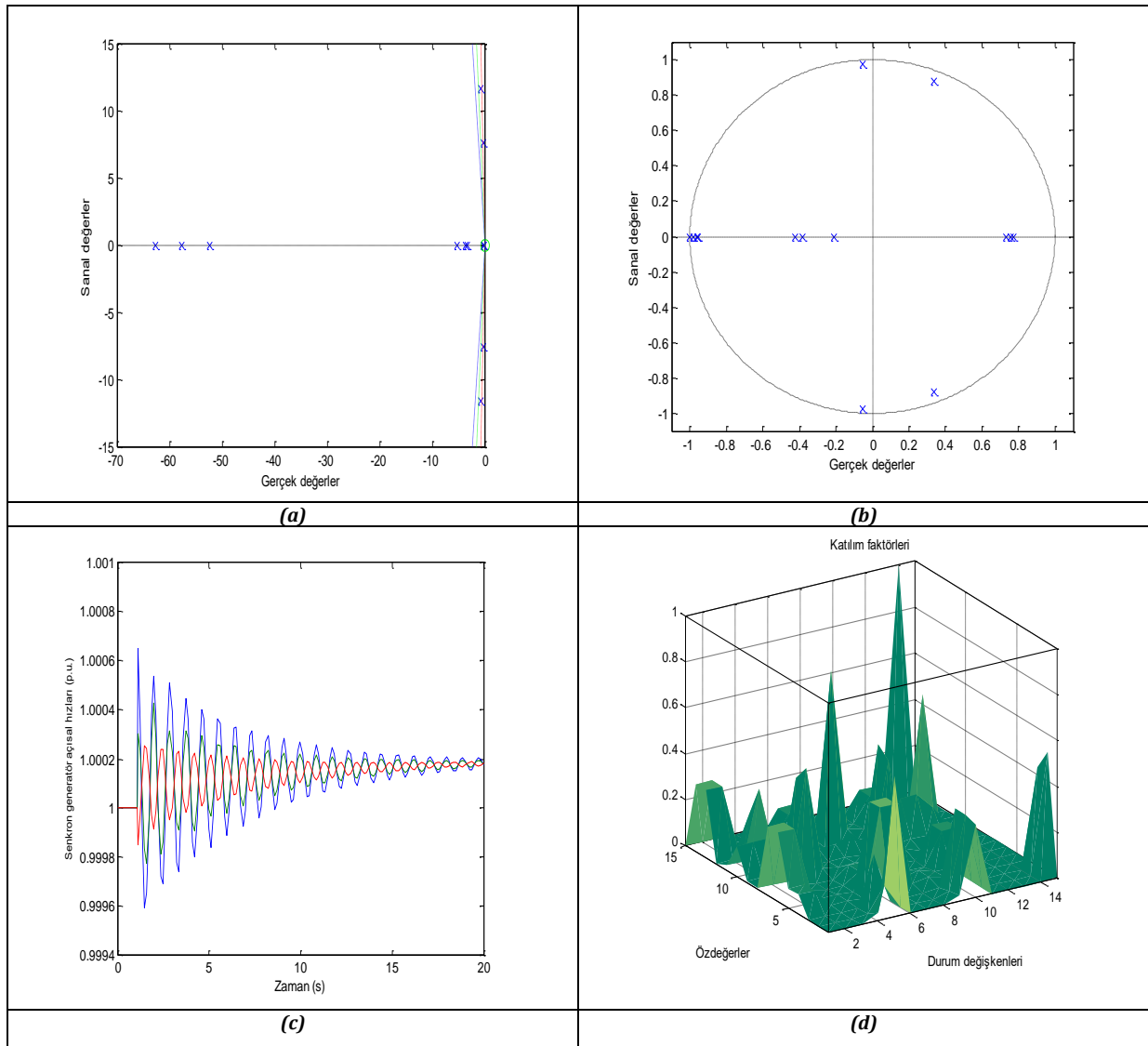
bağlanırken, sekonder gerilim kontrolü 2 ve 3 numaralı generatör baralarında gerçekleştirilmiştir. Sekonder gerilim kontrolünde kullanılan pilot bara için 6 numaralı bara seçilmiştir. Sistemde 2 ile 7 numaralı baralar arasında ve 3 ile 9 numaralı baralar arasında transformatörler kullanılmıştır. Bu çalışmada 5 ile 7 numaralı baralar arasında kullanılan kesicinin belli bir süre devre dışı kalıp tekrar devreye girmesi ile geçici durum oluşturulmuştur. Geçici durum süresi 1 ile 1.1 saniyeler arasındadır. Bu çalışmada sadece farklı otomatik gerilim regülatörü modelin kullanılması ile analiz öncesinde denemeler yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda en iyi sonuç veren otomatik gerilim regülatörü 3 modeli tercih edilmiştir. Benzetim çalışmasında 2 farklı durum analiz edilmiştir. Birinci durumda güç sisteminde otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durum için karşılaştırmalar yapılırken, ikinci durumda otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanıldığı duruma ait karşılaştırmalar detaylı olarak incelenmiştir.

6. Benzetim Çalışması Sonuçları

PSAT programı kullanılarak yapılan analizlerde benzetim çalışmasında öncelikli olarak yük akışı analizi yapılarak bara gerilim profile en düşük olan bara belirlenmiştir. Bu bara pilot bara olarak isimlendirilmiştir. Daha sonra zaman alanı ile geçici kararlılık analizi incelenmiştir. Bu analizden sonra özdeğer analizi sonuçları elde edilmiştir. Bu analizler tablolar ile gösterilmiştir. 3 makineli 9 baralı güç sisteminde otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durum analizleri ilk aşamada incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 makinelı 9 baralı sistem



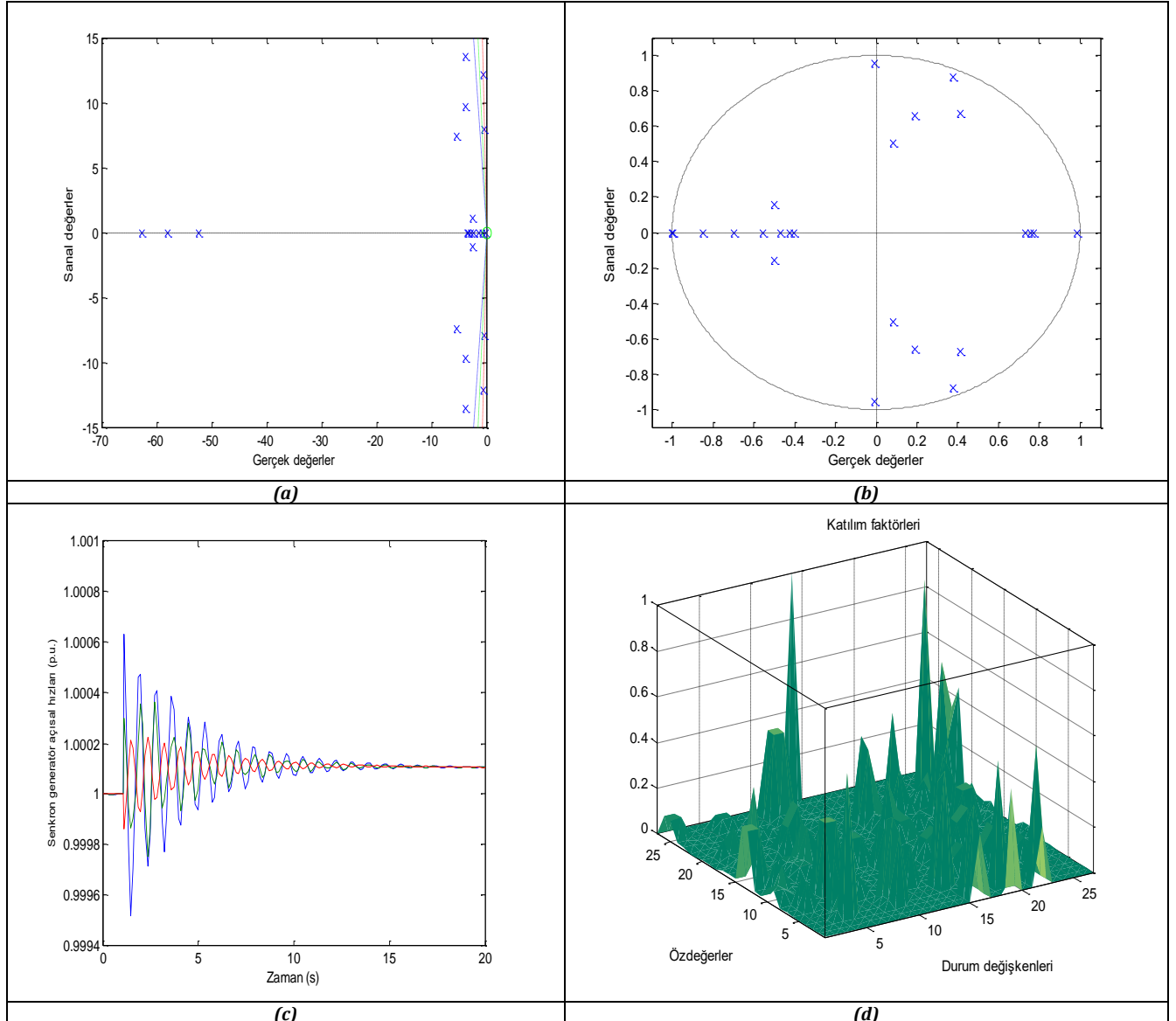
Şekil 3. Otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolü kullanılmadığı durumda elde edilen sonuçlar.

Elde edilen sonuçlarda, 3.a gerçek değer ve sanal değerlerde sistem parametrelerinin kararlı olduğu bölgeyi gösterirken; 3.b tüm parametrelerin gerçek değer ve sanal değerlerde kararlı ve kararsız olduğu durumları göstermektedir. Şekil 2.c otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durumda senkron generatörlerin açısal hız değerlerini sunmaktadır. Şekil 2.d ise özdeğerler, durum değişkenleri ve katılım faktörleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 15 durum değişkeninden 11 tanesinin gerçek ekseninde, 2 tanesinin sıfır ekseninde ve 2 tanesinin de sanal ekseninde olduğu görülmektedir. Senkron generatörün açısal hız değişimlerinde ise sistemin geç sürede kararlı hale geldiği görülmektedir. Senkron generator açısal hız değişimlerinin otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durumda yaklaşık olarak 21.5 saniyede

kararlı hale geldiği görülmektedir. Otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durumda elde edilen küçük sinyal kararlılığı sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo1. Otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durumda bulunan küçük sinyal kararlılığı sonuçları

| Özdeğerler (λ) | Sönüm Yüzdesi | Frekans | Baskın değerler | Çalışma modları |
|---------------------------|---------------|---------|---------------------------|-----------------|
| -0.77171 ± 11.6309 | 6.62 | 1.8552 | SG delta 2, SG omega 2 | Yerel alan |
| -0.207491 ± 7.5749 | 2.74 | 1.206 | SG delta 1, SG omega 1 | Yerel alan |



Şekil 4. Otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolü kullanıldığı durumda elde edilen sonuçlar

Tablo 1'e göre otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durumda baskın makineler senkron generatör 1 ve 2'nin açılı ve açılma hız değerleri olmaktadır. Çalışma modu ise her iki özdeğerde yerel alan olmaktadır. Senkron generatörlerde otomatik gerilim regülatörü kullanılmıştır. Sekonder gerilim kontrolünde pilot bara 6 numaralı bara olurken, merkezi alan kontrolü ve küme kontrolü 2 ile 3 numaralı senkron generatöre uygulanmıştır. Bu durumda elde edilen sonuçlar Şekil 4'te detaylı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.a ve Şekil 4. b'de parametrelerin sayısının arttığı görülmektedir. Buna benzer olarak, Şekil 4.d'de özdeğer sayısı ve durum değişkeni sayısının arttığı görülmektedir. Toplamda 27 adet olan değişkenlerden 25 tanesinin sanal eksende olduğu görülmektedir. 2 tane değer gerçek eksende olduğu ve 0 değişkenin sıfır ekseninde olduğu görülmektedir. Senkron generatör açılma hız değişimlerinde de sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği görülmektedir. Senkron generator açılma hız değişimlerinin otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durumda yaklaşık olarak 19 saniyede kararlı hale geldiği görülmektedir. Otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanıldığı durumda bulunan küçük sinyal kararlılığı sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo2. Otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanıldığı durumda bulunan küçük sinyal kararlılığı sonuçları

| Özdeğerler (λ) | Sönüm Yüzdesi | Frekans | Baskın değerler | Çalışma modları |
|--------------------------|---------------|---------|------------------------------|-----------------|
| -0.54903 ±12.1381 | 4.52 | 1.9318 | SG delta 2, SG omega 2 | Yerel alan |
| -0.3698 ±7.9084 | 4.67 | 1.26 | SG delta 1, SG omega 1 | Yerel alan |

Tablo 2'de otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanıldığı durumda baskın makinelerin otomatik gerilim regülatörü ve sekonder gerilim kontrolünün kullanılmadığı durumdakine benzer şekilde, senkron generatör 1 ve 2'nin açılı ve açılma hız değerleri olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, çalışma modu ise her iki özdeğer sonucuna göre yerel alan olmaktadır.

7. Sonuçlar

Çok makineli güç sistemlerinde kararsızlık durumlarını ortadan kaldırmak için yaygın olarak kullanılan denetleyicilerden bir tanesi otomatik gerilim regülatörüdür. Otomatik gerilim regülatörünün geçici

kararlılık esnasındaki etkisini arttırmak için bu çalışmada ek olarak sekonder gerilim kontrolü de tercih edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, küçük sinyal kararlılığında otomatik gerilim kontrolü ve sekonder gerilim kontrolünün birlikte kullanılması ile sistemin özdeğerler açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Dahası senkron generatör açılma hız değişiminde de görüldüğü gibi otomatik gerilim kontrolü ve sekonder gerilim kontrolünün beraber kullanılması ile sistemin kısa zaman içerisinde kararlı hale geldiği görülürken, sistemde oluşan salınımların da kısa süre içerisinde sönümlendiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile, senkron generatörlerde kullanılan diğer denetleyici modelleri ile farklı test sisteminde sekonder gerilim kontrolünün birlikte kullanılması ile çeşitli analizlerin yapılabileceği ortaya çıkarılmıştır.

Kaynaklar

- [1] Kumar, A. (2020). Nonlinear AVR for power system stabilisers robust phase compensation design. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(21), 4927-4935.
- [2] Dudgeon, G. J., Leithead, W. E., Dysko, A., o'Reilly, J., & McDonald, J. R. (2007). The effective role of AVR and PSS in power systems: Frequency response analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 1986-1994.
- [3] Rommes, J., Martins, N., & Freitas, F. D. (2009). Computing rightmost eigenvalues for small-signal stability assessment of large-scale power systems. *IEEE transactions on power systems*, 25(2), 929-938.
- [4] Salim, R. H., & Ramos, R. A. (2012). A model-based approach for small-signal stability assessment of unbalanced power systems. *IEEE transactions on power systems*, 27(4), 2006-2014.
- [5] Keskes, S., Bouchiba, N., Sallem, S., Chrifi-Alaoui, L., & Kammoun, M. B. A. (2017, May). Transient stability enhancement and voltage regulation in SMIB power system using SVC with PI controller. In *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)* (pp. 115-120). IEEE.
- [6] Morsali, J., Kazemzadeh, R., Azizian, M. R., & Morsali, H. (2012, May). Novel coordination of dual-channel PSS, AVR and TCSC damping controller to enhance power system overall stability. In *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)* (pp. 552-557). IEEE.
- [7] Abdalla, O. H., Ghany, A. A., & Fayek, H. H. (2016, December). Coordinated PID secondary voltage control of a power system based on genetic algorithm. In *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)* (pp. 214-219). IEEE.

- [8] Florez, J., Tapia, A., Criado, R., & Griajalba, J. M. (1994). Secondary voltage control based on a robust multivariable PI controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 16(3), 167-173.
- [9] Tapia, R., Aguilar, O., Minor, H., & Santiago, C. (2012). Power system stabilizer and secondary voltage regulator tuning for multi-machine power systems. *Electric Power Components and Systems*, 40(16), 1751-1767.
- [10] Döşoğlu M. K., & Kaymaz E. (2023). Güç sistemlerinde farklı güç sistemi kararlı kılıcısı modellerin sekonder gerilim kontrolü üzerindeki etkileri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 15(2), 49-58.
- [11] Su, H. Y., & Liu, C. W. (2013). An adaptive PMU-based secondary voltage control scheme. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3), 1514-1522.
- [12] Mohammadi-Ivatloo, B., & Hosseini, S. H. (2008, May). Optimal PMU placement for power system observability considering secondary voltage control. In *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* (pp. 000365-000368). IEEE.
- [13] S. Essallah, A. Buallegue, ve A. Khedher, "Integration of Automatic Voltage Regulator and Power System Stabilizer: Small-Signal Stability in DFIG-Based Wind Farms," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, c. 7, sayı 5, ss. 1115-1128, 2019.
- [14] Pillai, A. G., Thomas, P. C., Sreeranjini, K., Baby, S., Joseph, T., & Sreedharan, S. (2013, June). Transient stability analysis of wind integrated power systems with storage using central area controller. In *2013 Annual International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy* (pp. 1-5). IEEE.
- [15] Kundur P (1994) Power system stability and control. McGraw Hill, New York.
- [16] Essallah S., Buallegue A., Khedher A., "Integration of Automatic Voltage Regulator and Power System Stabilizer: Small-Signal Stability in DFIG-Based Wind Farms," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, c. 7, sayı 5, ss. 1115-1128, 2019.
- [17] Milano, F. (2005). An open source power system analysis toolbox. *IEEE Transactions on Power systems*, 20(3), 1199-1206.