



# Kendinden Uyarımlı Asenkron Jeneratörün Değişken Yük ve Hızlarda Kondansatör Hesabının Gerçekleştirilmesi

## Capacitor Calculation of Self-Excited Induction Generator at Variable Loads and Speeds

Ersin SELÇUK<sup>1</sup>, Hayri ARABACI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektronik Teknolojisi Programı  
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
eselcuk@ktun.edu.tr

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi  
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
hayriarabaci@selcuk.edu.tr

### Özet

Rüzgâr enerji sistemlerinde kendinden uyarımlı asenkron jeneratör (KUAJ) yaygın olarak tercih edilmektedir. Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün gerilim üretebilmesi için dışarıdan harici bir reaktif güce ihtiyacı vardır. Jeneratörün ihtiyacı olan reaktif güç, stator terminallerine bağlanan kondansatörler yardımıyla karşılanır. Bağlanan kondansatörlerin değeri, jeneratör çıkış geriliminin büyüklüğünü doğrudan etkiler. Gerilim ayrıca jeneratörün hızına ve yükün durumuna göre değişkenlik gösterdiğinden uyarım kondansatörlerinin değerinin doğru olarak hesaplanması oldukça önemlidir. Bu çalışmada değişken hız değerlerinde ve çeşitli yüklerde jeneratörün ihtiyaç duyduğu kondansatör değerini hesaplayan GUI (Arayüz) uygulaması gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan arayüz jeneratör parametrelerini, hız aralığını ve yük değerini giriş olarak kullanır ve girilen hız aralığına bağlı olarak kapasite-hız eğrisini çıkış olarak verir. Elde edilen grafikler KUAJ'a bağlanacak olan kondansatör değerinin asenkron jeneratörün hızıyla, jeneratör yük akımıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir.

### Abstract

Self-excited induction generator (SEIG) is widely preferred in wind energy systems. A self-excited induction generator needs an external reactive power to generate voltage. The reactive power needed by the generator is met with the help of capacitors connected to the stator terminals. The value of the capacitors connected directly affects the magnitude of the generator output voltage. It is very important to calculate the value of the excitation capacitors correctly since the voltage also varies according to the speed of the generator and the state of the load. In this study, a GUI (Interface) application that calculates the capacitor value needed by the generator at variable speed values and various loads has been implemented. The created interface uses generator parameters, speed range

and load value as input and outputs a capacitance-speed curve depending on the entered speed range. The graphs obtained showed that the capacitor value to be connected to the SEIG is directly related to the speed of the asynchronous generator and the generator load current.

### Terimler Dizisi

$R_s$	: Stator direnci
$X_s$	: Stator reaktansı
$R_r$	: Rotor direnci
$X_r$	: Rotor reaktansı
$R_L$	: Yük direnci
$X_L$	: Yük reaktansı
$X_m$	: Mıknatıslanma reaktansı
$X_{msat}$	: Doyum bölgesindeki maksimum mıknatıslanma reaktansı
$C$	: Faz başına uyarım kondansatörü değeri
$C_{min}$	: Minimum uyarım kondansatör değeri
$X_C$	: Faz başına kapasitif reaktans (uyarım kondansatörü reaktansı)
$F$	: Bağlı frekans
$f_b$	: Baz frekans
$v$	: Bağlı hız
$N$	: devir/dakika cinsinden jeneratör hızı

## 1. Giriş

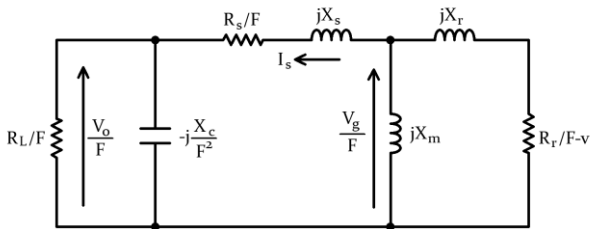
Fosil yakıt kaynaklarının azalmasından dolayı son zamanlarda yenilebilir enerji sistemlerine olan ilgi artmıştır. Özellikle rüzgâr enerji sistemlerindeki çalışmalar son dönemlerde hız kazanmıştır. Kazanılan bu ivme ile rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılan senkron jeneratörlerin yerini, yapısının basitliği, fırçalı bir yapının bulunmamasından dolayı bakım gerektirmemesi, düşük maliyeti ve kısa devre arızalarına karşı kendini koruması gibi avantajlarından dolayı kendinden uyarımlı asenkron jeneratörler (KUAJ) almıştır [1].

Asenkron makinelerin, Senkron ve DC makineler gibi uyarma devresi yoktur ve diğer jeneratörlerden farklı olarak uyarma için herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar. Asenkron jeneratörün tüm bu avantajlarının yanında değişken hız altında reaktif güç tüketiminin fazla olması ve zayıf gerilim regülasyonu, bu jeneratörlerin en büyük dezavantajlarıdır [2]. Şebekeden bağımsız çalışan KUAJ'ın gerilim üretebilmesi için jeneratöre dışarıdan harici reaktif güç verilmesi gerekir. KUAJ için bu reaktif güç stator terminallerine bağlanan kondansatörler yardımıyla sağlanır [3]. Stator terminallerine bağlanan kondansatörlerin değeri kritik öneme sahiptir. Çünkü KUAJ çıkış gerilimi; jeneratör hızına, yük akımına ve statora bağlanan kondansatörlerin değerine göre değişkenlik göstermektedir [4]. KUAJ terminal gerilimini sabit tutabilmek için jeneratörün yüksüz ve tam yük koşullar altında farklı kondansatör değerleri devreye alınmalıdır [5]. Asenkron jeneratör için gerekli olan kondansatör değeri, istenilen gerilim seviyesi için belirli hız ve yük durumu için hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama, jeneratörün tek faz eşdeğer devresi üzerinden sürekli durum analizi yapılarak elde edilir [6]. Sürekli durum analizi iki farklı yöntem ile yapılabilir. Bu yöntemlerden birincisi olan çevre empedans (Loop Impedance) yöntemi ile KUAJ tek faz eşdeğer devresi çözümlenerek bir polinom bulunur ve polinom köklerinden KUAJ için kondansatör değeri hesaplanır. Diğer bir yöntem ise düğüm admitansları (Nodal Admittance) yöntemidir. Bu yöntemle de kondansatör değeri hesaplanabilir. Ancak birinci yöntemin aksine daha yüksek dereceli polinomlar elde edildiğinden çözümü daha zordur [7].

Bu çalışmada kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün sürekli durum analizi çevre empedans yöntemi kullanılarak yapılmış ve KUAJ'ın ihtiyaç duyduğu kondansatör değeri, çeşitli yük ve hız aralıklarında hesaplanmıştır. Belirli hız aralıklarında hesaplanan kondansatör değerleri, GUI (Arayüz) kullanılarak kapasite-hız eğrisi oluşturulmuştur.

## 2. Kendinden Uyarımlı Asenkron Jeneratörün Sürekli Durum Analizi

Sürekli durum analizi için kullanılan rezistif yük bağlanmış kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün bir faz eşdeğer devresi Şekil 1'de verilmiştir. Kullanılan eşdeğer devrenin son hali referanslarda görülmektedir. Eşitliklerde hesaplama kolaylığı sağlaması için jeneratör parametreleri, iki kez bağlı frekans (F) değerine bölünmüştür. Bu bölümün sonucu olarak  $R_s$  direncinde F'ye bölme,  $X_s$  ve  $X_r$  reaktanslarında yalınlık ortaya çıkmıştır [6, 7].



Şekil 1: Rezistif yük bağlı kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün bir faz eşdeğer devresi

Şekil 1'deki eşdeğer devreye göre, çevre denklemi ile denklem (1) yazılabilir.

$$I_s Z = 0 \quad (1)$$

Burada Z empedansı için çevre empedansı yöntemi kullanılarak denklem (2) elde edilir.

$$Z = \left[ \left( \frac{R_r}{F-v} + jX_r \right) \parallel (jX_m) \right] + \left( \frac{R_s}{F} + jX_s \right) + \left[ \left( \frac{-jX_c}{F^2} \right) \parallel \left( \frac{R_L}{F} + jX_L \right) \right] \quad (2)$$

Jeneratör sürekli durum altında  $I_s \neq 0$  olacağından denklem (1)'e göre  $Z = 0$  olmalıdır. Denklem (2)'nin çözülmesiyle reel ve imajiner kısımlar sırasıyla denklem (3) ve denklem (4)'de ki gibidir.

$$\text{Re}\{Z\}: \quad -A_1 F^3 + A_2 F^2 + (A_3 X_C + A_4) F - A_5 X_C = 0 \quad (3)$$

$$\text{Im}\{Z\}: \quad -B_1 F^4 + B_2 F^3 + (B_3 X_C + B_4) F^2 - (B_5 X_C + B_6) F - X_C B_7 = 0 \quad (4)$$

Denklem (3) ve denklem (4)'de bulunan  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  ve  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7$  katsayıları Ek A'da verilmiştir.

Bir KUAJ'ın kendi kendini uyarabilmesi için miktanslanma reaktansı  $X_m$ 'nin doyum bölgesinde çalışması gerekir. Bu nedenle belirlenen hız ve yük durumu için uyarım reaktansı ( $X_c$ ) ve miktanslanma reaktansı ( $X_m$ ) her zaman bu bölgede olacak şekilde bir değere sahip olmalıdır. Bu çalışmada istenilen kondansatör değerini bulabilmek için miktanslanma reaktansı  $X_m = X_{msat}$  olacak şekilde kabul edilmiştir [6].

Denklem (3)'de bulunan  $X_c$  ifadesi çekildiğinde denklem (6) elde edilir.

$$X_c = \frac{A_1 F^3 - A_2 F^2 - A_4 F}{A_3 F - A_5} \quad (6)$$

Aynı şekilde denklem (4) kullanılarak  $X_c$  ifadesi denklem (7)'de ki gibi tekrar yazılabilir.

$$X_c = \frac{B_1 F^4 - B_2 F^3 - B_4 F^2 - B_6 F}{B_3 F^2 - B_5 F - B_7} \quad (7)$$

Denklem (6) ve denklem (7)'de ki  $X_c$  ifadeleri birbirlerine eşit olduğundan dolayı bu iki denklemden faydalanılarak bağlı frekansa (F) bağlı 4. dereceden denklem (8) elde edilir.

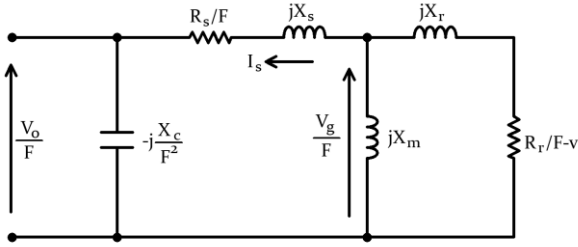
$$k_4 F^4 - k_3 F^3 + k_2 F^2 - k_1 F + k_0 = 0 \quad (8)$$

Denklem (8)'e ait  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  katsayıları Ek B'de verilmiştir. Denklem (8)'in çözümüyle dört farklı gerçek kök elde edilir. Elde edilen köklerden uygun olanı uyartım kondansatörünü seçmek için kullanılır. Eğer denklemin çözümünde gerçek kökler bulunmuyorsa jeneratörün kendi kendini uyarması mümkün değildir. Denklemin uygun olan kökü bağlı frekans olarak seçilir ve KUAJ için uyartım kondansatör değeri denklem (9) ile bulunur.

$$C = \frac{1}{2\pi f_b X_C} \quad (9)$$

### 2.1. KUAJ'ın Boşta (Yüksüz) Çalışması Özel Durumu

KUAJ'ın boşta çalışmasında yük direnci  $R_L = \infty$  ve yük reaktansı  $X_L = 0$  olarak kabul edildiğinde jeneratörün bir faz eşdeğer devresi şekil 2'deki gibi olur.



Şekil 2: Kendinden uyartımlı asenkron jeneratörün boşta(yüksüz) bir faz eşdeğer devresi

Şekil 2'deki bir faz eşdeğer devresi dikkate alınarak sürekli durum analizi yapıldığında KUAJ'ın belirli bir hız altında çalışmadığı kesim hızı (cutoff speed)  $v_c$  değeri denklem (10) kullanılarak bulunur [6].

$$v_c = \frac{2R_s}{X_{msat}} \sqrt{\frac{R_r}{R_s} + \left(1 + \frac{X_r}{X_{msat}}\right)^2} \quad (10)$$

Kesim hızının elde edilmesiyle maksimum bağlı frekans  $F_{max}$  ifadesi denklem (11) kullanılarak elde edilir.

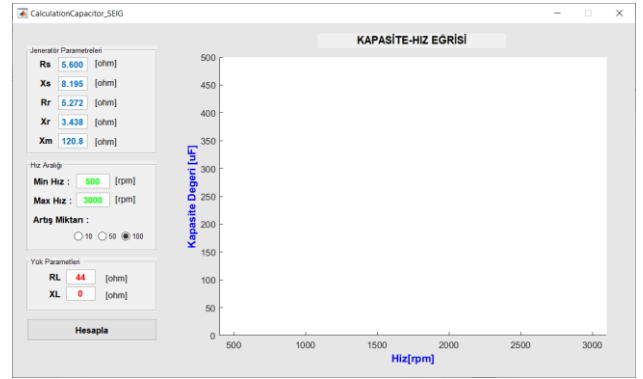
$$F_{max} = \frac{v}{2} \left\{ 1 + \frac{\frac{R_s}{R_r} \left(1 + \frac{X_r}{X_{msat}}\right)^2 + \sqrt{1 - \left(\frac{v_c}{v}\right)^2}}{1 + \frac{R_s}{R_r} \left(1 + \frac{X_r}{X_{msat}}\right)^2} \right\} \quad (11)$$

Denklem (10) ve denklem (11)'de ki bulunan ifadeler jeneratörün boşta çalışması durumundaki  $C_{min}$  değerinin hesaplanması için gereklidir. Bulunan bu değerler yardımıyla belirlenen hız değeri için KUAJ'ın boşta (yüksüz durumdaki) minimum uyartım kondansatör değeri denklem (12) ile bulunabilir [6].

$$C_{min} = \frac{1}{2\pi f_b F_{max}^2 (X_r + X_{msat}) \left( \frac{R_s}{R_r} F_{max} (F_{max} - v) + F_{max}^2 \right)} \quad (12)$$

### 3. GUI Uygulamasının Geliştirilmesi

Kendinden uyartımlı asenkron jeneratör sürekli durum analizi yapıldıktan sonra belirlenen yük ve hız aralıklarında, KUAJ'ın ihtiyaç duyduğu kondansatör değerini etkin bir şekilde gözlemek için şekil 3'teki gibi bir GUI arayüzü tasarlanmıştır. Tasarlanan GUI yardımıyla jeneratöre ait kapasite-hız eğrisi çizdirilmiştir.

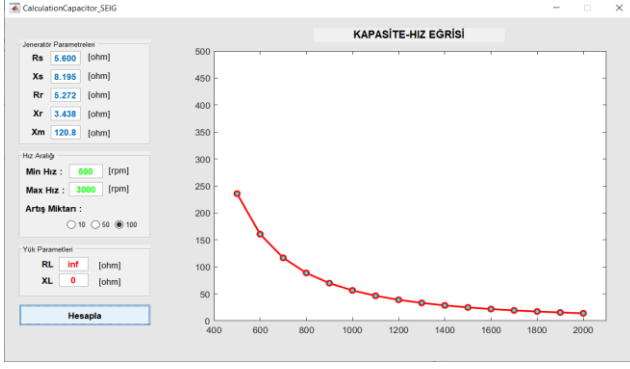


Şekil 3: Tasarlanan GUI arayüzü

GUI arayüzünde sistem girişleri için, jeneratör parametreleri, jeneratör hız aralıkları ve yük parametreleri kullanılmıştır. Bütün parametrelerin eksiksiz bir şekilde girilmesinden sonra hesapla butonu ile KUAJ'ın belirli hız aralıklarına bağlı olarak program arka planında kondansatör değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan kondansatör değerleri kullanılarak KUAJ'a ait kapasite-hız eğrisi çizdirilmiştir.

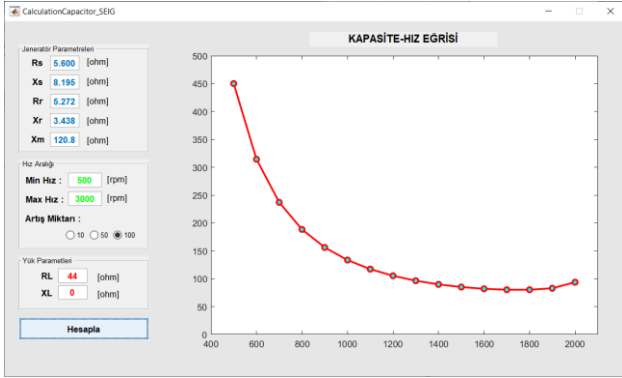
### 4. Sonuçlar

Tasarlanan GUI arayüzü ile Ek C'de verilen asenkron jeneratör parametreleri kullanılarak belirli hız aralıklarında jeneratörün ihtiyaç duyduğu kapasite değerleri hesaplanmıştır. Jeneratör uç gerilimi 230V sabit olarak kabul edilmiştir. Şekil 4'te jeneratörün boşta çalışmasına ait 500 rpm ile 2000 rpm hız aralıklarındaki  $C_{min}$  grafiği gösterilmiştir. Asenkron jeneratörün 1500 rpm nominal devirdeki kondansatör değeri 25,78µF olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4: KUAJ'ın boшта (yüksüz) çalışmasına ait kapasite-hız eğrisi

Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörün rezistif yükte ( $R_L = 44 \Omega$  ve  $X_L = 0 \Omega$ ) çalışmasına ait kondansatör değerleri ise şekil 5'te verilmiştir. Bu grafikte de asenkron jeneratör, 500 rpm ile 2000 rpm hızlarında 100'er rpm aralıklarla çalıştırılmış ve her hız değerine ait kondansatör değeri hesaplanmıştır. Jeneratörün nominal devirdeki (1500 rpm) kapasite değeri  $85,07\mu\text{F}$  olarak bulunmuştur.



Şekil 5: KUAJ'ın rezistif yükteki çalışmasına ait kapasite-hız eğrisi

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere asenkron jeneratörün stator terminallerine bağlanan kapasite değeri, asenkron jeneratörün hızıyla, jeneratör yük akımıyla doğrudan ilişkilidir. Düşük devirlerde jeneratörün gerilim üretebilmesi için gereken kapasite değeri büyük değerlerde iken, yüksek devirlerde kapasite değerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

## 5. Kaynaklar

- [1] G. Singh, "Self-excited induction generator research—a survey," *Electric Power Systems Research*, vol. 69, no. 2-3, pp. 107-114, 2004.
- [2] R. Bansal, "Three-phase self-excited induction generators: an overview," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 292-299, 2005.
- [3] H. Arabaci, "An iterative solution approach for steady state analysis of self-excited induction generator," *International Journal of Intelligent Engineering Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 309-322, 2019.
- [4] D. Chermiti, N. Abid, and A. Khedher, "Voltage regulation approach to a self - excited induction generator: theoretical study and experimental validation," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 5, p. e2311, 2017.

- [5] A. S. Özer, F. Sevilmiş, H. Karaca, and H. Arabacı, "Enhanced control method for voltage regulation of DSTATCOM based SEIG," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 839-847, 2022.
- [6] A. Al Jabri and A. Alolah, "Capacitance requirement for isolated self-excited induction generator," in *IEE Proceedings B-Electric Power Applications*, 1990, vol. 137, no. 3: IET, pp. 154-159.
- [7] T. Chan, "Steady-state analysis of self-excited induction generators," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 9, no. 2, pp. 288-296, 1994.

## Ek A

$$A_1 = R_L (X_s + X_m) + X_L (X_s + X_m) (R_s + R_r)$$

$$A_2 = v (X_s + X_m) \left( R_L \left( X_s + \frac{X_s X_m}{X_s + X_m} \right) + R_s X_L \right)$$

$$A_3 = R_r (X_L + X_s + X_m) + (X_s + X_m) (R_s + R_L)$$

$$A_4 = R_L R_s R_r$$

$$A_5 = v (X_s + X_m) (R_L + R_s)$$

$$B_1 = X_L (X_s + X_m) \left( X_s + \frac{X_s X_m}{X_s + X_m} \right)$$

$$B_2 = v B_1$$

$$B_3 = (X_s + X_m) \left( X_L + X_s + \frac{X_s X_m}{X_s + X_m} \right)$$

$$B_4 = R_L (X_s + X_m) (R_s + R_r) + R_s R_r X_L$$

$$B_5 = v B_3$$

$$B_6 = v R_L R_s (X_s + X_m)$$

$$B_7 = R_r (R_L + R_s)$$

## Ek B

$$k_0 = A_5 B_6 + A_4 B_7$$

$$k_1 = A_3 B_6 + A_5 B_4 - A_4 B_5 - A_2 B_7$$

$$k_2 = A_2 B_5 + A_3 B_4 - A_4 B_3 - A_1 B_7 - A_5 B_2$$

$$k_3 = A_2 B_3 + A_1 B_5 - A_3 B_2 - A_5 B_1$$

$$k_4 = A_1 B_3 - A_3 B_1$$

### **Ek C**

$R_s = 5,600 \Omega$   
 $R_r = 5,272 \Omega$   
 $X_s = 8,195 \Omega$   
 $X_r = 3,438 \Omega$   
 $X_m = 120,8 \Omega$   
 $P = 1100 \text{ W}$   
 $N = 1500 \text{ rpm}$