

## BİRİM DEĞER (P.U. = PER-UNIT) SİSTEMİ

Makinelerin çalışma değerleri fiziksel birimlerle söylendiğinde, o makinenin normal çalışma değerlerine oranla ne derecede büyük değerlerle çalıştığı genellikle belli olmaz. Birim değer (p.u.) sistemi, fiziksel birimlerdeki büyüklüklerin, taban alınan bazı değerlere oranlanarak verilmesidir, ki taban değerler genellikle makinenin anma değerleri alınır. Mesela 10 A'lık bir motor 11,3 A ile çalışıyorsa akımına 1,13 p.u. deriz ve aşırı akımla çalıştığı hemen anlaşılır. P.u. sistemi ile pek çok hesaplama daha basitleşir ve ayrı bir anlaşılabilirlik kazanır.

Akım, gerilim, empedans veya admitans ve güç değerleri fiziksel birimlerden p.u. sisteme dönüştürüldükten sonra yapılan hesaplamaların sonuçları yeniden fiziksel birimlere dönüştürülerek de kullanılır.

### Anma Değerlerine Göre Taban Seçerken Dikkat:

- Üç fazlı sistemlerde hat değerleri ve tek faz değerleri için tabanlar ayrı ayrı kendi anma değerleri alınır.

$$\text{Yıldız ise} \quad V_1^{tb} = V_h^{tb} / \sqrt{3} \quad I_1^{tb} = I_h^{tb}$$

$$\text{Üçgen ise} \quad V_1^{tb} = V_h^{tb} \quad I_1^{tb} = I_h^{tb} / \sqrt{3}$$

- Trafolarda primer ve sekonder için tabanlar ayrı ayrı kendi anma değerleridir.
- Empedans, direnç ve reaktans için tabanlar ortaktır ve “tek faz gerilim tabanı” / “tek faz akım tabanı” oranıdır.

$$R_{tb} = X_{tb} = Z_{tb} = \frac{V_1^{tb}}{I_1^{tb}}$$

- Admitans, iletkenlik ve süseptans için tabanlar ortaktır ve “tek faz akım tabanı” / “tek faz gerilim tabanı” oranıdır. Yani  $1 / \text{“empedans tabanı”}$ .

$$G_{tb} = B_{tb} = Y_{tb} = \frac{1}{Z_{tb}} = \frac{V_1^{tb}}{I_1^{tb}}$$

- Üç fazlı sistemlerde empedans ve admitans tabanları tek faz tabanlarıyla hesaplanır. Trafolarda primer ve sekonder için ayrı ayrıdır.
- Görünür güç, aktif güç ve reaktif güç için tabanlar ortaktır ve anma görünür gücüdür.

$$P_{tb} = Q_{tb} = S_{tb}$$

$$S_1^{tb} = V_1^{tb} I_1^{tb}$$

$$S_h^{tb} = \sqrt{3} V_h^{tb} I_h^{tb} = 3 S_1^{tb}$$

- Trafolarda p.u. sistemi içindeki hesaplamalarda primer-sekonder arası yansıtma yapılmaz, zaten aynıdır.

## Örnek

Üç fazlı, 50 Hz'lik, 1000 devir/dakikalık, Y bağlı, 380V'luk, 20 kVA'lık silindirik rotorlu bir senkron alternatöre açık devre ve kısa devre testleri yapılıyor. Aşağıdaki sonuçlar (hat değerleri) elde ediliyor.

Açık Devre Testi	
Uyartım akımı (A)	Armatür hat gerilimi (V)
0,35	110
0,70	220
1,05	315
1,40	380
1,75	420

Kısa Devre Testi	
Uyartım akımı (A)	Armatür hat akımı (A)
0,35	8,0
0,70	16,0
1,05	24,0
1,40	32,0
1,75	40,0

Ayrıca bağlantılar söküldükten sonra statorun iki hat ucu arasından, diğer uç boştayken, sargı direnci  $3,2 \Omega$  ölçülüyor. P.u. cinsinden makinanın doymuş ve doymamış senkron empedans ve reaktansları ile kısa devre oranını bulunuz.

### Çözüm:

Ölçümler hat değerleri olarak verildiği için tabanları da doğrudan hat değerleri için kullanarak p.u. değerleri bulalım.  $V_h^{tb} = 380 V$  ve  $I_h^{tb} = 20kVA/(\sqrt{3} \cdot 380V) = 30,39A$  (anma hat akımı).

Ancak empedans tabanı için gerilim ve akımın tek faz tabanları kullanılır:

$$V_1^{tb} = 380V/\sqrt{3} = 219,39V \text{ ve } I_1^{tb} = I_h^{tb} = 30,39A$$

$$Z^{tb} = \frac{V_1^{tb}}{I_1^{tb}} = \frac{219,39V}{30,39A} = 7,22 \Omega$$

Y bağlantıdan dolayı tek faz sargı direnci:

$$r_1 = \frac{3,2\Omega}{2} = 1,6\Omega \quad \rightarrow \quad r_1^{pu} = \frac{1,6}{7,22} = 0,2216 p.u.$$

Sorunun devamı normal birimlerle yapılarak empedans ve reaktanslar  $Z^{tb}$  ile p.u.'ya çevrilebilir. Ya da şöyle devam edilebilir:

Doymuş senkron empedans ( $Z_{s,doymuş}$ ) için anma gerilimi  $V_h^{pu} = 1,000 p.u.$

ADK'daki aynı uyartım akımında (1,40A'de) KDK'da  $I_h^{pu} = 32,0/30,39 = 1,053 p.u.$

$$Z_{s,doymuş}^{pu} = \frac{1,000}{1,053} = 0,9496 p.u.$$

Doymuş senkron reaktans ise:

$$X_{s,doymuş}^{pu} = \sqrt{0,9496^2 - 0,2216^2} = 0,9234 p.u.$$

Doymamış senkron empedans ( $Z_{s,doymamış}$ ) için ADK'nın doğrusal bölgesinden herhangi bir gerilim

$$V_h^{pu} = \frac{110}{380} = 0,2895 p.u.$$

Aynı uyarım akımı için KDK'daki akım:

$$I_h^{pu} = \frac{8,0}{30,39} = 0,2633 \text{ p.u.}$$

$$Z_{s,\text{doymamış}}^{pu} = \frac{0,2895}{0,2633} = 1,0995 \text{ p.u.}$$

Doymamış senkron reaktans ise:

$$X_{s,\text{doymamış}}^{pu} = \sqrt{1,0995^2 - 0,2216^2} = 1,0769 \text{ p.u.}$$

Kısa devre oranı uyarım akımlarının oranından hesaplandığı için uyarım akımlarını p.u.'ya çevirmeye gerek yoktur. Ancak KDK'da anma akımında (30,39A) ölçüm olmadığı için KDK'nın doğrusallığından faydalanarak herhangi bir kısa devre akımıyla orantı kurarak anma akımının KDK'da

$$\frac{1,75}{40,0} \cdot 30,39A = 1,329A$$

uyarım akımına karşılık geldiği görülür. Buna göre kısa devre oranı (p.u. **denilmez**, zaten orandır)

$$\frac{1,40}{1,329} = kdo = 1,0531$$

**Dikkat:** Daima

$$kdo = \frac{1}{Z_{s,\text{doymuş}}^{pu}}$$

(Doymuş empedansı  $\Omega$  cinsinden kullanırken böyle bir formül geçerli değildir.)

Burada da  $kdo = 1/0,9496 = 1,0531$  olduğu görülmektedir.

## Örnek

3 fazlı, 4000V'luk,  $\Delta$  bağlı, 69,3 kVA'lık, silindirik rotorlu bir senkron alternatörün senkron reaktansı  $X_{sg} = 30 \Omega/\text{faz}$ 'dır. Yine 4000V'luk, silindirik rotorlu ve 69,3 kVA'lık, fakat Y bağlı bir senkron motorun senkron reaktansı ise  $X_{sm} = 20 \Omega/\text{faz}$  olup, bahsedilen alternatör ile armatür hatları birleştirilmiştir. Alternatör motoru anma geriliminde ve anma gücünde birim güç faktörü ile besleyecek şekilde her iki makinenin uyarım akımları ayarlanıyor. Daha sonra uyarım akımları bu değerlerinde sabit tutulurken motor maksimum güç durumuna kadar yükleniyor. Maksimum güç durumunda fazlar arası terminal gerilimini ve güç faktörünü bulunuz.

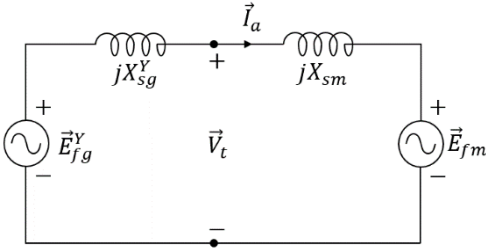
## Çözüm:

Kullandığımız yöntemin geçerli olması için, jeneratör ve motorun reaktanslarının toplanabilir (seri) olması gerekir; yani  $\Delta$  bağlı jeneratörün Y eşdeğerini kullanmalıyız. Dengeli  $\Delta$  bağlı sistemin Y eşdeğerindeki tek faz empedans veya reaktansı,  $\Delta$  bağlı halindeki üçte biridir:

$$X_{sg}^Y = \frac{X_{sg}}{3} = \frac{30 \Omega}{3} = 10 \Omega$$

Her iki taraf da Y, ve anma güç ve hat gerilimi her iki makinede de aynı olduğuna göre tek faz anma gerilimi  $V_1^{tb} = 4000V/\sqrt{3} = 2309,4 \text{ V}$  ve anma akımı  $I_1^{tb} = (69300VA/3)/2309,4V = 10,00A$ . Yani

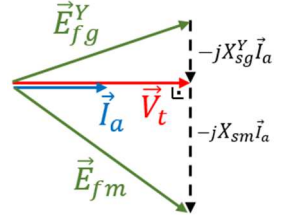
$$Z_{tb} = \frac{2309,4V}{10,00A} = 230,9 \Omega \quad \rightarrow \quad X_{sm}^{pu} = \frac{20}{230,9} = 0,0866 \text{ p.u.} \quad X_{sg}^{Ypu} = \frac{10}{230,9} = 0,0433 \text{ p.u.}$$



Birim g.f. çalışmasında  $\vec{V}_t^{pu} = 1,00 p.u. \angle 0^\circ$  (ilk açı keyfi) ve görünür güç de anma değerinde olduğundan  $\vec{I}_a^{pu} = 1,00 p.u. \angle 0^\circ$

$$\vec{E}_{fm} = \vec{V}_t - jX_{sm}\vec{I}_a$$

$$\vec{E}_{fg}^Y = \vec{V}_t + jX_{sg}^Y\vec{I}_a$$

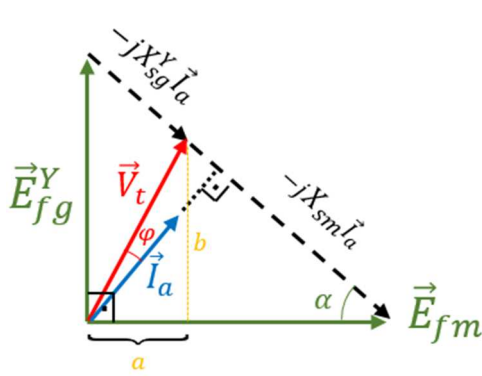


Bu formüller p.u. değerlerle de kullanılabilir:

$$\vec{E}_{fm}^{pu} = 1,00 - j0,0866 \times 1,00 = (1,00 - j0,0866) p.u. = \frac{1,00374 p.u. \angle (-5,0^\circ)}{E_{fm}^{pu}}$$

$$\vec{E}_{fg}^{Y,pu} = 1,00 + j0,0433 \times 1,00 = (1,00 + j0,0433) p.u. = \frac{1,000938 p.u. \angle 2,5^\circ}{E_{fg}^{Y,pu}}$$

Uyartım akımları ve hız (frekans) sabit olduğu için maksimum güç çalışmasında  $E_{fg}^Y$  ve  $E_{fm}$  büyüklükleri aynı değerlerdedir. Kolaylık için bu defa  $\vec{E}_{fm}$  açısını  $0^\circ$  kabul edelim.  $\vec{E}_{fg}^Y$  ise bundan  $90^\circ$  ileride olur.



$$\vec{E}_{fm}^{pu} = 1,00374 p.u. \angle 0^\circ$$

$$\vec{E}_{fg}^{Y,pu} = 1,000938 p.u. \angle 90^\circ = j1,000938 p.u.$$

$$\text{Hipotenüs} = (X_{sg}^Y + X_{sm})I_a = \sqrt{(E_{fg}^Y)^2 + (E_{fm})^2}$$

$$\left( \frac{0,0433 + 0,0866}{0,1299 p.u.} \right) I_a^{pu} = \frac{\sqrt{(1,00374)^2 + (1,000938)^2}}{1,4175 p.u. (\text{gerilim})}$$

$$I_a^{pu} = 1,4175 / 0,1299 = 10,91 p.u.$$

Akımın bu kadar büyük çıkması, maksimum güç durumunun bu senkron reaktanslara göre muhtemelen sakıncalı bir çalışma olacağı anlamına gelmektedir. Akımın açısı ise  $90^\circ - \alpha$  'dır.

$$\cos \alpha = \frac{E_{fm}}{\text{Hipotenüs}} = \frac{1,00374}{1,4175} = 0,7081 \quad \sin \alpha = \frac{E_{fg}^Y}{\text{Hipotenüs}} = \frac{1,000938}{1,4175} = 0,7061$$

$$\alpha = 44,9^\circ, \quad 90^\circ - \alpha = 45,1^\circ, \quad \vec{I}_a^{pu} = 10,91 p.u. \angle 45,1^\circ$$

$\vec{V}_t$  ise  $a$  ve  $b$  ile bulunabilir:

$$a = E_{fm} - X_{sm}I_a \cos \alpha \rightarrow a^{pu} = 1,00374 - 0,0866 \times 10,91 \times 0,7081 = 0,3346 p.u.$$

$$b = X_{sm}I_a \sin \alpha \rightarrow b^{pu} = 0,0866 \times 10,91 \times 0,7061 = 0,6673 p.u. (\text{bunlar p.u. gerilim})$$

$$V_t = \sqrt{a^2 + b^2} \rightarrow V_t^{pu} = \sqrt{0,3346^2 + 0,6673^2} = 0,7465 p.u.$$

Açısı ise  $\tan^{-1}(b/a) = \tan^{-1}(0,6673 / 0,3346) = 63,4^\circ$ . Yani  $\vec{V}_t^{pu} = 0,7465 p.u. \angle 63,4^\circ$

Güç açısı  $\varphi = 63,4^\circ - 45,1^\circ = 18,3^\circ$ . Güç faktörü =  $\cos 18,3^\circ = \cos \varphi = 0,9495$  geri.

Şimdi maksimum güç durumundaki tek faz ve hat gerilimlerini volt cinsinden bulmak istersek:

$$V_t^Y = V_t^{pu} V_1^{tb} = 0,7465 \times 2309,4V = 1724V$$

$$V_{t,hat} = V_t^{pu} V_h^{tb} = 0,7465 \times 4000V = 2986V$$

( $\Delta$  bağlı alternatörün tek faz gerilimi de bu hat gerilimidir.)