

# 2 İK 55 ENLİ HİDROELEKTRİK (ÇIKIK KUTUPLU SENKRON) GENERATORLERİNİN TEMEL BAĞLANTILARINDAKİ EĞİK LEVHALAR İÇİN EN UYGUN EĞİM AÇISI\*

Yazan: W. Kellenberger, BBC  
Çeviri: Elk. Yük. Müh. Ekrem ALTINLI

## ÖZET

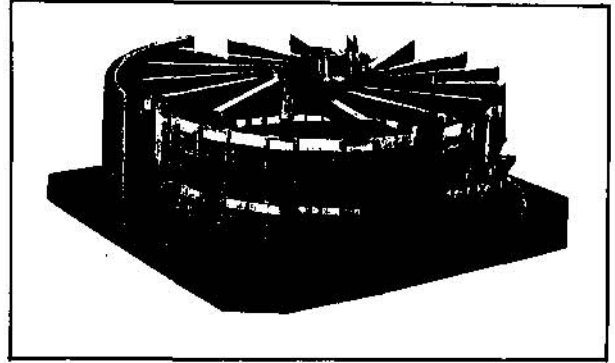
Dik eksenli, büyük güçlü Hidroelektrik (çıkık kutuplu senkron) generatorlar, doğrultuları merkezden geçmeyecek şekilde konumlandırılmış esnek mesnetler üzerine inşa edilirler. Bunun amacı, hem temelleri hem de statoru korumak ve de oluşacak ısı gerilmeleri azaltmaktır. Esnek olma özellikleri kullanılmak suretiyle helezon (sarmal), disk veya levha şeklinde mesnetler elde edilir. Bunlar sadece çap doğrultusunda düzenlendiğinde etkilidirler. Bunun yanı sıra teğetsel doğrultuda etki eden ilave bir yaylanma elde etmek suretiyle temeldeki kısa devre kuvvetleri en aza indirgenebilir. BBC örneğinde, eğik yaylanma elemanları ile adı geçen her iki fayda da birarada elde edilir. Bunlardan yaylanma etkisi levha eğiklik açısı, üç yük şartı (ısıl genleşme, moment ve çapsal kuvvet) birarada incelenerek tespit edilir.

## GİRİŞ

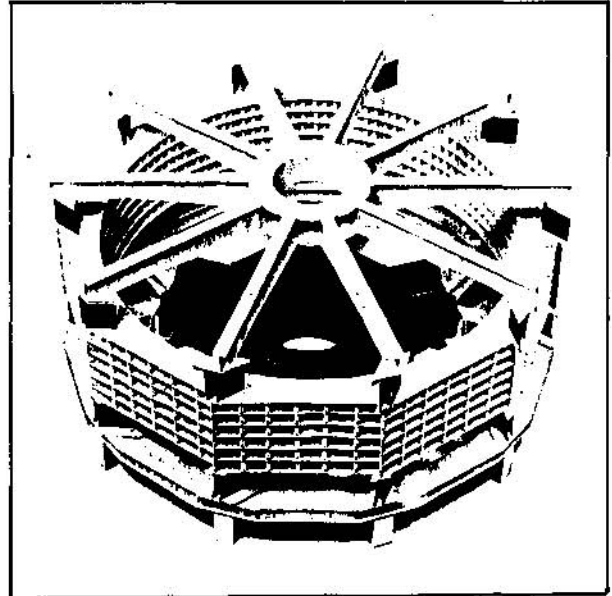
Büyük güçlü Hidroelektrik generatorlar m statorlarının temellerine masif olarak bağlanması yöntemi, işletme şartlarında belirli birkaç kötü özelliğe sahiptir. Şöyle ki stator magnetik devre, işletme şartlarında stator karkasından daha fazla ısınır. Bunun sonucu, magnetik devrede eğilmelere neden olabilecek büyük teğetsel basma gerilmeleri oluşur.<sup>1</sup> Bundan dolayı, stator karkası temele ne kadar esnek bağlanır ise, bu ısıl gerilmeler o kadar emniyetli değerlere iner. Aynı durum stator karkası ve temelden daha fazla ısınan, üst yatay taşıyıcının gövde kısmı için de geçerlidir. Basma gerilmeleri levhalarda, teğetsel gerilmeler de temelde ve stator karkasında oluşur. Bu gerilmeler, esnek elemanlar ve yaylar kullanılmak suretiyle serbest bırakılabilir. Yaylanma elemanları (helezon-sarmal, disk ve yaylanma levhaları-makaslar) fazla yer işgal etmelerinin yanı sıra pahalıdır. Temel üzerine etkiyen kısa devre kuvvetleri, teğetsel yönde etkili yaylanma elemanlarıyla azaltılabilir. BBC tarafından ilk örneği verilmiş olan bu eğik levhalar ve eğik kollu yaylanma elemanları bu güçlükleri en uygun çözümü sağlar (2,3,4,5).

Şekil 1, üstte eğik kollu, altta eğik levha yaylanma elemanlı eski çözümü gösterir. Oysa Şekil 2, altta ve üstte eğik levha yaylanma elemanlı yeni çözümü gösterir.

Şekil 2deki çözüm daha az yer gerektirir ve levhaların çevresel olarak sıralanması imkanı sağlar.



ŞEKİL 1. Hidroelektrik (çıkık kutuplu senkron) generatorlar için yatak taşıyıcı ve stator tasarımı (Maket). Eğik levha kollar ile temele mesnetlenmiş bir statora üst yatak taşıyıcının eğik kollar ile bağlanması.



ŞEKİL 2. Hidroelektrik (çıkık kutuplu senkron) generatorlar için yatak taşıyıcı ve stator tasarımı (Maket). Ost yatak taşıyıcı eğik levhalı yaylanma elemanları ve çapsal kollar ile statora mesnetlenmiştir. Aynı zamanda eğik levhalı yaylanma elemanları statoru temele bağlamak için de kullanılmıştır.

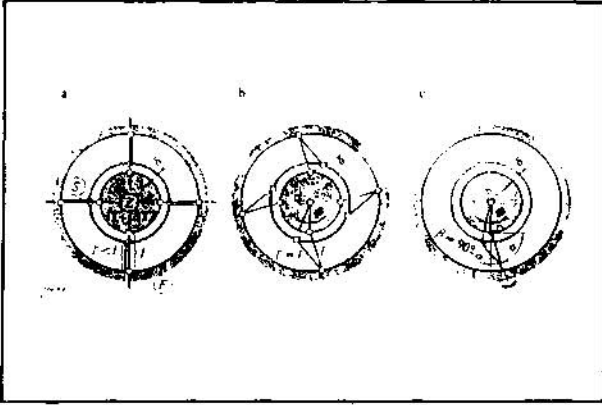
\* BBC Publication N. CH-T 130 223E'den alınmıştır.

## STATOR MESNETLERİNİN İŞLEVİ

Eğik kolların ve eğik levhaların işlevi Şekil 3'te gösterilmiştir. Önce, statorun da (Z) temelinde (F) masif olduğu varsayılacaktır. Temele nazaran AT ısı farkı neticesi stator (Z) genişler ve büyür. Başlangıçta levhalar mafsallı olarak birleştirilmiştir. Yükleme levhaları daha da kısaltılacak şekilde çapsal doğrultuda düzenlenir (Şekil 3a). Bunlar, temelde çekmeye stator karkasında da basmaya sebep verecek gerilmeler oluşturur. Bunun yanı sıra eğik levhaları durumda (Şekil 3b), stator küçük bir  $\theta$  açısı kadar döner. Levhalar uzunluklarını korur ve hiçbir ısı gerilme oluşmaz.

Her ne kadar levhaların masif olarak bağlanması statoru etkilemez ise de zaten uygulama güçlüğünden dolayı levhaların mafsallı bağlanması düzeneğine yer verilmez. Levhalar konumlarında sabitleştirildiğinde, elastik bozunmaya uğrayacaklardır (Şekil 3c). Çapsal doğrultuya nazaran eğik düzenleme sonucunda, ısı genleşme nedeniyle daha az kuvvetler ileten eğik levhaları yaylanma elemanları ortaya çıkacaktır. Benzer biçimde, Şekil 2'de görüleceği üzere eğik kollu yaylanma elemanları üst yatak taşıyıcı mesnetleri için de göz önüne alınabilecektir.

Her iki durumda da seçilen eğrilik açısı, yaylanma üzerinde etkilidir. Uygun bir  $\alpha$  açısı var mıdır?  $\alpha$ 'daki değişmeye sistem ne kadar duyarlıdır? Bu iki soruya aşağıda cevap arayalım:



ŞEKİL 3. Eğik kolların, eğik levhaların ve yaylanma elemanlarının işlevi.

(a) Alelade çapsal düzenleme. AT ısı farkı, ısı genleşme  $\delta$ , stator (Z), kollar (S), temelde (F) gözden uzak tutulmaması gerekli gerilme kuvvetleri üretir. Olası tehlike stator magnetik devrenin yanal eğilmesidir.

1, 1': kolların sırasıyla soğuk ve sıcak durumda uzunlukları.

(b) Eğik levhaları yaylanma elemanlı örnek düzenleme. ısı farkı stator (Z) az bir dönmeye neden olur. Hiçbir ısı gerilme yoktur.

(j) : stator dönme açısı.

(c) Yaylanma elemanlarının bağlantı yerlerinin masif hale getirilmesi, şiddeti az da olsa kuvvetlere neden olur.

## MESNETLEME SİSTEMLERİ İÇİN ÜÇ YÜK ŞARTININ İNFLANSMESİ

Yaylanma elemanları, gerek kararlı çalışma ve gerekse kararsız çalışma şartlarından oluşan kuvvetleri emniyetli olarak söndürecek şekilde boyutlandırılmalıdırlar. Anma şartlarındaki çalışma esnasında bu kuvvetler anma momentinden ve ısı genleşmeden ortaya çıkarlar. Oysa kararsız çalışma şartları esnasında, bunlar rotor kısa devresinden ortaya çıkan bir çapsal kuvveti veya stator kısa devresinden ortaya çıkan bir momenti içerirler. İlaveten rotor ile stator arasındaki nispeten küçük hava aralığı eşit merkezlemeyi gerektirir. Böylece, temele eğik levhalar ile bağlanmış bir stator (Z) araştırılması gerekli yükler; ısı genleşme, moment (kısa devrede) ve çapsal kuvvet (merkezleme)'dir.

örnek olarak biz aşağıdaki özelliklere sahip bir generatoru göz önünde bulunduracağız. 283 MVA, 60 Hz, 94.7 d/d, stator iç çapı 0 14600 mm. ve 16 kolludur. Kararlı parametreler  $\alpha$  eğim açısının bir fonksiyonu olarak hesaplanmış, grafik olarak sunulmuştur ve açıklanmıştır. Sonuçta, bunlar en uygun kol açısı  $\alpha$ 'nın elde edilmesine neden olacaktır.

### Isıl Genleşme

Şekil 4'de statorun (merkez cisim Z) temelden (F) daha sıcak olduğu, ısının Z'den F'ye bir düşüş sergilediği farzedilsin. F ile Z arasındaki aşın ısı genleşme  $\delta$ 'dır. Eğik kollar statora masif olarak sabitlenmiş temele ise emniyetli ve esnek olarak (eksenel esnek dönme) bağlanmıştır. Temele kolları sabitlemek için kullanılan yaylanma katsayısı k ile verilir. Kolların sabitleme noktası P, sıcaklıktaki değişiminin etkisi altında P'ne hareket eder. Stator, küçük bir  $\theta$  açısı kadar döner. Kollar uzunlukta p kadar kısalmış ve P noktasının köşeye nispeten yer değiştirmesi x'dir. Eğik kolların her iki sabiti; me noktasındaki boyuna etkiyen kuvvet L, enine kuvvet O ve eğilme momenti M'dir. Verilen değişiklikler,  $\delta$ ,  $\alpha$  ( $\alpha = 90^\circ - \delta$ ), R, r, eğilme şiddeti EI, eğik kolların ekstenel mukavemet momenti W ve kesit alanı A'dır. Biz aşağıda, kollarındaki mekanik gerilmeleri tesbit etmeye çalışacağız.

Kolların uzunluğu, Şekil 4'deki geometriden elde edilir.

$$s = \sqrt{R^2 - r^2 \cos^2 \alpha} - r \sin \alpha \quad (1)$$

$$\alpha = 0^\circ \text{ ise } s = \sqrt{R^2 - r^2}$$

$$\alpha = 90^\circ \text{ ise } s = R - r$$

$$\alpha (0 = 90^\circ - \alpha) : \text{ Eğiklik veya kol açısı}$$

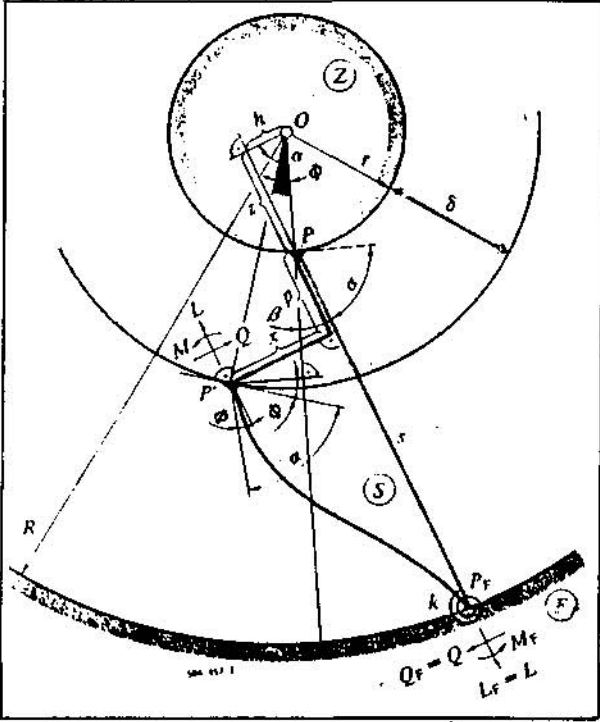
$\delta, p, x < r, R; v < \sqrt{v^2 + p^2}, x^2 = 0; \sin 0 = 0$  kabulleriyle, Şekil 4'deki geometriden aşağıdaki bağıntıyı yazabiliriz.

$$x = \frac{5}{\cos \alpha} - p \tan \alpha ; \langle t \rangle = \frac{5}{r} \tan \alpha - \frac{p}{r \cos \alpha} \quad (2)$$

Kollardaki kuvvetlerin dengesi ile  $L_p = \hat{\phantom{x}}$  ,  $Q_p = Q$  ;  
 $M_p = Lx - M + Q(s-p)$  ve  $x, p < s$  kaydıyla,

$$L_p = L ; Q_F = Q \text{ ve } M_F = -M + Qs \quad (3)$$

yazabiliriz. Alt ucundan esnek sabitlenmiş  $s$  uzunluklu bir çubuk için cisimlerin mukavemeti teorisine göre  $M$  ile  $0$  kuvvetleri arasında aşağıdaki ilişkiyi yazarız (Çubukların üst ucundaki  $<p$  dönme açısı, statorun dönme açısı  $0$ 'ye eşittir).



ŞEKİL 4. "Isıl genişleme" yük şartı

- Z : Stator veya merkezi gövde
- S : Kol veya eğik levha (uzunluk =  $s$ )
- F : Temel veya stator karkası üst kısmı
- S : Verilen ısıl genişleme
- $a(\neq 90^\circ - \hat{f})$  : Kol veya eğik levha açısı
- 0 : Stator dönme açısı
- $x, p$  : Biçimsel bozunmalar ( $x, J, p$ )
- $M, Q, L$  : Eğilme momenti. Enine kuvvet, Boyuna kuvvet
- $k$  : Yaylanma sabiti
- O : Merkez nokta
- F : Z'deki kollarn bağlantı noktası
- Pp : F'deki kollarn bağlantı noktası
- R, r, h, z : Geometrik büyüklükler

$$M = ax - b\phi \quad a = \frac{6EI}{s^2} \left[ \frac{1+2K}{1+4K} \right]$$

$$Q = cx + a\phi \quad b = \frac{4EI}{s} \left[ \frac{1+3K}{1+4K} \right] \quad (4)$$

$$K = \frac{EI}{ks} \quad c = \frac{12EI}{s^3} \left[ \frac{1+K}{1+4K} \right]$$

$K = 0$  ( $k = \infty$ ) iken, masif bir yapı elde ederiz.  $1/K = 0$  ( $k = 0$ ) iken, mafsallı birleştirilmiş bir yapı elde ederiz. Denklem (4) ve (3) ile aşağıdakileri elde ederiz.

$$M_p = a_p x + b_p \phi ; a_F = \frac{6EI}{s^2} \left[ \frac{1}{1+4K} \right]$$

$$b_F = \frac{2EI}{s} \left[ \frac{1}{1+4K} \right] \quad (5)$$

Stator momente maruz kalmamalıdır. Yani merkez nokta O'da kol kuvvetlerinden ortaya çıkan moment yok olmalıdır. Bu yüzden,

$$L(x+h) - M - Q(z+p) = 0$$

$$h = r \cos a, \quad z = r \sin a$$

ve  $x < h$  ;  $p \hat{=} z$  kabulüyle, denklem

$$Lh - M - Qz = 0 \quad (6)$$

elde edilir. Denklem (4) ve (6) ile aşağıdakileri elde ederiz.

$$L = a_L x + b_L \phi ; a_L = \frac{a + cr \sin a}{r \cos a}$$

$$b_L = \frac{b + ar \sin a}{r \cos a} \quad (7)$$

Kuvvet dengeleri denklemleri (3), (4), (5) ve (6)'yı matrisel olarak yazarsak;

$$\begin{bmatrix} M \\ Q \\ M_F \\ L = L_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & a \\ a_F & b_F \\ a_L & b_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

Denklem (7) yardımıyla, biçimsel bozunmalar arasında daha da ileri düzeyde ilişkiler elde edebiliriz. Hook kanunuyla;

$$P = \frac{Ls}{AE} = \frac{s}{AE} (a_L x + b_L \phi) = \frac{sa_L}{AE} x + \frac{sb_L}{AE} \phi \quad (9)$$

Denklem (2) ve (9) bize biçimsel bozunmalar  $x, \phi$  ve  $p$ 'nin hesaplanması imkanını sağlar. Bunlar doğrusal 3 denklem ortaya koyarlar. Elde edilenleri matrisel olarak yazalım;

$$\begin{bmatrix} \frac{r_{sa} L}{AE} & \frac{r_{tb} L}{AE} & -1 \\ 1 & 0 & \tan a \\ 0 & 1 & \frac{1}{r \cos a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\cos a} \\ \frac{\tan a}{r} \end{bmatrix} \quad (10)$$

veya biçimsel olarak,  $\underline{A} \hat{=} j S \quad \underline{z} = \begin{bmatrix} x \\ \phi \\ p \end{bmatrix}$

biçimsel çözüm olarak da

$$\underline{z} = (\underline{A}^{-1} \underline{a}) \underline{6}$$

elde edilir.

Determinant A, tüm a değerleri için sıfırdan farklıdır. O yüzden bilinmeyen üç büyüklük x,  $\phi$ , p kolaylıkla tespit edilebilir. Bu üç büyüklüğün değişimi, ısı genleşme  $\underline{6}$  ile orantılıdır. x ve  $\phi$  kullanılarak denklem (8)'den kuvvetler hesaplanabilir. Geriye bağlantı noktasında kollarındaki mekanik gerilmeleri hesaplamak kalır. Cisimlerin mukavemeti teorisinden bilinen ilişkileri kullanarak, şunları yazabiliriz;

		Bağlantı Noktası	
		Stator ( $P_t : P$ )	Temel ( $P_t : P_f$ )
Basma gerilmesi	Op	L/A	L/A
Eğilme gerilmesi	(Jg)	M/W	M/W (11)
Kesme gerilmesi (Birleşik gerilme: $CTR = D + ff B$ )		9/A	9/A

Yukarıda bahsedilen 16 kollu makina için; Şekil 5, a açısının değişimine bağlı olarak statordaki bağlantı noktalarında oluşan mekanik gerilmeleri gösterir ( $\alpha = 90^\circ - a$ ). Isıl gerilme konusunu aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

- Bağlantı noktalarındaki ısı gerilmeler kol sayısından bağımsızdır.

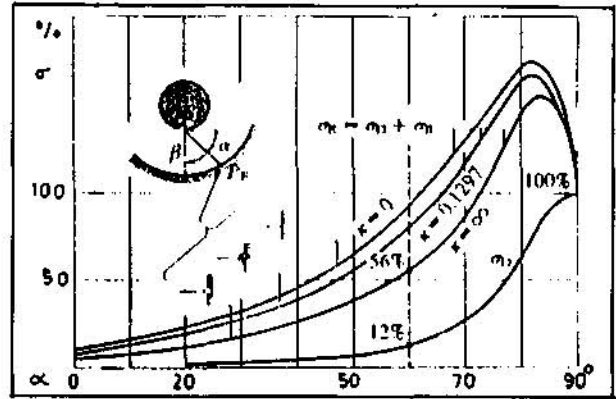
-  $a = 60^\circ$  için; Basma gerilmesi OQ kollar çapsal doğrultuda düzenlendiğinde elde edilen değer sadece % 12'sidir. Basma kuvveti  $L = A a_d$  statora ve temele çapsal doğrultuda yönelmiş bir kuvvet olarak etkir. Böylece eğik kollar yönelmiş bu kuvveti % 88 oranında azaltacaktır ve temelin korunmasına hatırı sayılır mertebede katkıda bulunacaktır. Mağnetik devredeki yanıl eğilmeler oluşmayacaktır.

- Temeldeki kolların mafsallı olarak bağlanması en düşük düzeyde birleşik gerilmelerin oluşmasına neden olacaktır.

-  $0 = 60^\circ$  için; en büyük birleşik gerilme  $a^\wedge = OQ + ag$ , kollar çapsal doğrultuda mafsallı bağlantı ile düzenlendiğinde edinilen basma gerilmesinin % 56'sı kadardır.

- Daha küçük açı değeri ( $a < 60^\circ$ )'nin basma gerilmesi üzerine etkisi önemsizdir.

- Bu özel durum için; enine (teğetsel) düzenleme en uygun biçimi verir. Bununla birlikte, enine (teğetsel) düzenlemenin merkezleme üzerine etkisi çok az olduğundan ihmal edilecektir ("Çapsal kuvvet" yük şartı).



ŞEKİL 5. "Isıl genleşme" yük şartı.

Kol açısı  $a$  ( $\alpha = 90^\circ - \alpha$ )'nın değişimine göre statordaki kollarında ( $P_t$  ve  $P$ ) oluşan mekanik gerilmeler, O. Temele olan bağlantının türü K ile ifade edilmiştir.  $Oj^\wedge = Oj + CTg$ : Birleşik gerilme  
 $Oj$ : Basma gerilmesi, Eğilme gerilmesi

$$K = \frac{1}{k} \frac{El}{s} \cdot \text{Boyutsuz sabit katsayı}$$

(Arta kalan büyüklükler için Şekil 4'e bakınız).

#### Moment

#### Kuvvetler ve Biçimsel Bozunmalar

Şekil 6'da stator (merkez gövde Z) üzerine dışarıdan bir kuvvet uygulandığını kabul edelim. Bunun sonucu kolların boyu p kadar artar ve kol x mesafesi kadar yana bel verir (p'ye dik olarak). Stator küçük bir  $\alpha$  açısı kadar döner. Kol sayısı t'dir.

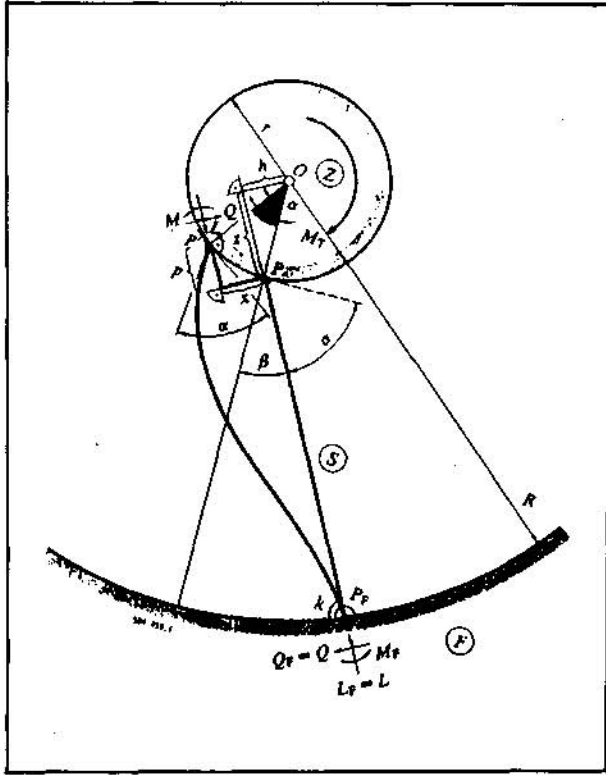
Burada şu büyüklükler verilir:  $M_j$ ,  $a$  ( $0 = 90^\circ - \alpha$ ), R, r, El, A ve W. Koldaki kuvvetlerin dengesi için, denklem (3), (4) ve (5)'teki gibi ısı genleşmede kullanılan ilişkiler uygulanır.

$$M_1 = ax + b\phi$$

$$9 = 9_f = cx + a\phi \quad (12)$$

$$M_f = a_r x + b_f \phi$$

$$L_f = L$$



**ŞEKİL 6.** "Moment" yük şartı  
**M<sub>f</sub>** : Verilen moment  
**a** ( $\beta = 90^\circ - a$ ) : Eğik kol açısı  
**0** : Stator dönme açısı  
**x, p** : Biçimsel bozunmalar ( $x \perp p$ )  
**M, Q, L** : Eğilme momenti, Enine kuvvet, Boyuna kuvvet  
 (Arta kalan büyüklükler için Şekil 4'e bakınız).

a, b, c, ap ve bp için denklem (4) ve (5)'e bakınız. Statordaki (sabit gövde) eğik kollarda sabitleme kuvvetleri verilen momenti karşılamalıdır. "O" merkez noktasındaki moment dengesi için;

$$\frac{M_T}{t} = M + Q(z - p) + L(h + x)$$

yazabiliriz.  $x < h$  ;  $p < z$  varsayımı ile denklem biraz daha basitleşerek;

$$\frac{M_T}{t} = M + Qx + Lh \quad (13)$$

$h = r \cos a$ ,  $z = r \sin a$   
 Denklem (12) ve (13)'den;

$$L = \frac{M_T}{t r \cos a} - a, x - b, \langle t \rangle \quad (14)$$

elde edilir.  $a_j$  ve  $b_L$  için denklem (7)'ye bakınız. Denklem (12) ve (14)'den kuvvetlerin tümü matrisel olarak yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} M \\ \bar{Q} = \bar{Q}_p \\ M_F \\ L = L_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & a \\ a_F & b_F \\ a_L & -b_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ M_T \\ t r \cos a \end{bmatrix} \quad (15)$$

Şimdi geriye biçimsel bozunmalar x, a ve p'nin hesabını yapmak kalır. Şekil 6'daki geometriden görüldüğü üzere  $0^\wedge 1$  ;  $\sin(0/2) = 0/2$  ;  $\cos(0/2) = 1$  ;  $0^2 = 1$  varsayımıyla,

$$\begin{aligned} p &= \tan(\frac{\phi}{2} + 90^\circ - a) = -\cot(\frac{\phi}{2} - a) \\ &= \cot 0 + \frac{1}{2 \sin^2 a} \phi \end{aligned}$$

veya,

$$p = x \cot a + \frac{1}{2 \sin^2 a} x 0$$

vex,  $\langle t \rangle < 1$  ;  $x_0 = 0$  varsayımıyla,

$$p = x \cot a \quad (16)$$

Diğer taraftan, yine bir geometriden;

$$p^2 + x^2 = (r \sin 0)^2 + (r(1 - \cos 0))^2 = 2r^2(1 - \cos 0)$$

ve  $\cos 0 = 1 - 0^2/2$  yazabiliriz.

$$p^2 + x^2 = r^2 0^2 \quad \text{veya} \quad p/x = \sqrt{\frac{r^2 \phi^2}{x^2} - 1} \quad (17)$$

Denklem (16) ve (17)'de p/x yerine konulduğunda,

$$\begin{aligned} \frac{r^2 0^2}{x^2} - 1 &= \cot^2 a \quad \text{veya} \\ \frac{x}{r} &= 0 \sqrt{\frac{1}{1 + \cot^2 a}} = 0 \sin a \end{aligned} \quad (18)$$

yazabiliriz. Sonuç olarak yine Hook kanunu yardımıyla,

$$\begin{aligned} L &= p \frac{EI}{s} \quad \text{ve denklem (15)'den L yerine konarak,} \\ p \frac{EI}{s} &= \frac{M_T}{t r \cos a} - a, x - b, 0 \end{aligned} \quad (19)$$

yazarız. Üç denklem (16), (18) ve (19) üç bilinmeyen x, 0 ve p için tümüyle yeterlidir. Matris olarak yazacak olursak;

$$\begin{bmatrix} \cot a & 0 & -1 \\ 1 & -r \sin a & 0 \\ a_L & b_L & \frac{EA}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{t r \cos} \end{bmatrix} M_T \quad (20)$$

elde edilir. Biçimsel olarak;

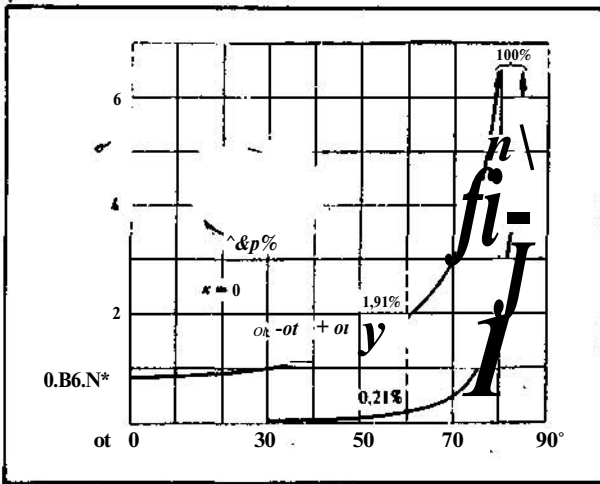
$$\underline{B} \underline{z} = \underline{b} M_T \quad \underline{z} = \begin{bmatrix} x \\ \phi \\ p \end{bmatrix}$$

yardımıyla,

$$\underline{z} = (S^{-1} \underline{b}) M_T \quad (21)$$

elde edilir.

Determinant B, tüm  $a$  değerleri için sıfırdan farklıdır. Bu yüzden  $z$ , kesin olarak tespit edilebilir. Her üç denklemde etkiyen momentle orantılıdır. Denklem (15)'e göre;  $x$  ve  $0$  yardımıyla  $z$ 'den kuvvetler de hesaplanabilir. Böylece denklem (H)'deki ilişkiler eğik kollardaki gerilmeler için uygulanır. Şekil 7, Eğik kolların statordaki bağlantı noktasında eğilme ve birleşik gerilmeleri tanımlanmış olan makina için; gerilmelerin  $a$  açısı ile değişimini gösterir. Bunlar sadece sabit bir moment için geçerlidir. Statordaki ve temeldeki eğik levhaların bağlantısının tümüyle masif yapıldığı varsayılmıştır ( $K = 0$ ).



ŞEKİL 7. "Moment" yük şartı (Kararlı işletme).

Sabit moment uygulama ön şartı ile kol açısına  $a$  ( $3 = 90^\circ - a$ ) bağlı olarak statordaki ( $P$ ;  $P$ ) kollarla oluşan mekanik gerilmelerin değişimi. Stator ve temeldeki ( $P$ ;  $P_p$ ) kolların bağlantısı masiftir ( $K = 0$ ).

$M_p$ : Moment

$\sigma_R = \sigma_B + \sigma_Z$ : Birleşik gerilme

$\sigma_B$ : Eğilme gerilmesi

$\sigma_Z$ : Çekme (veya basma) gerilmesi

### Burulma Yay Sabiti

Burulma yay sabiti  $E_y$  veya burulma sabiti, etkili momentin  $M_y$ , ortaya çıkan dönme açısına  $\theta$ , oranına eşittir.

$$E_T = M_T / \theta$$

Denklem (13)'e göre,

$$E_T = \frac{t}{g} (M + \zeta z + Lh) = \frac{t}{4} (M + 9 r \sin a + L r \cos a) \quad (22)$$

Kuvvetler  $M$ ,  $Q$ ,  $L$  denklem (15)'den, biçimsel bozunmalar  $x$ ,  $0$ ,  $p$  de denklem (21)'den elde edilir.

### Doğal Stator Frekansı,

#### Kısa Devre Kuvvetlendirme Katsayısı

Stator (merkez gövde), temele esnek eğik levhalarla bağlanır. Esnek eğik levhalarla birlikte statorun kütlesi, mekanik bir titreşim sistemi oluşturur. Statorun kütle atalet momenti  $0$  ise, burulma titreşiminin doğal frekansı

$$f = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{E_T / \theta} \quad (23)$$

dır. Böylece doğal frekans  $f$ 'nin şebeke frekansı  $f_N$ 'e oranı  $r$ 'i ise

$$\eta = f / f_N = \frac{1}{27 r f_N} \sqrt{E_T / \theta} \quad (24)$$

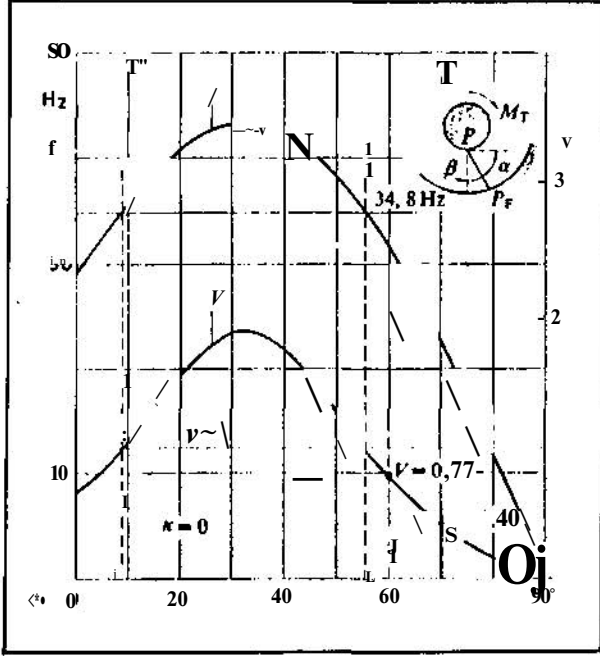
şeklinde yazılabilir. Frekans oranı  $r$ 'ye bağlı olarak, faz-nötr ve faz-faz kısa devrede temele etkiyen kısa devre momentinin bir kuvvetlendirme katsayısı vardır. Bu

$$v = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{3\eta}{(T^2 - 1)(T^2 - 4)} + \frac{T^2}{\eta^2 - 1} + \frac{\eta^2}{2(T^2 - 4)} \quad (25)$$

denklemlerle verilir (6).

$T$ ) değeri  $0,58$ 'in altında kalırsa, ( $f = i? f_N = 0,58 f_N = 29$  Hz. (50 Hz. için); 34,8 Hz. (60 Hz. için)), kuvvetlendirme katsayısı birden küçüktür (Yani  $v < 1$ 'dir). Buna mekanik yalıtım adı verilir ve temelde ortaya çıkan kısa devre kuvvetinin azalmasına neden olur. Bu yüzden doğal frekansın 29 Hz. (veya 34,8 Hz.)'in altında tutulabilmesi mümkün olduğunda buna gayret sarfedilmelidir. Ne yazık ki bu kaçınılmaz büyük sapmalar birer engel

oluşturur. Şekil 8,  $a$  açısına bağlı olarak ani bir kısa devre durumunda "kuvvetlendirme katsayısı"  $v$  ve "doğal frekans"  $f$ 'nin değişimini gösterir. Yine biz, temel ve statordaki eğik kolların bağlantılarının masif olduğu durumu inceliyoruz ( $K = 0$ ).



**ŞEKİL 8.** "Moment" yük şartı (Stator kısa devre). Statorun doğal dönme frekansı  $f$  ve moment kuvvetlendirme katsayısı  $v$ 'nin eğilme açısı  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  ya bağlı değişimi. Hava aralığında, stator kısa devresindeki momentin temele etkileyen momente olan oranı  $v$ 'dir.  $v < 1$  olması durumu, temele etkileyen kısa devre momentindeki azalmayı gösterir. Bu durumda 60 Hz'lik generatorlar için  $f = 34,8$  Hz. doğal frekans sınırdır (Arta kalan büyüklükler için Şekil 7'ye bakınız).

### Sonuçlar

- Tümüyle sabit bir moment uygulandığında (Şekil 7) enine (teğetsel) düzenlemede ( $a = 0^\circ$ ) kollar, çapsal (boyuna,  $a = 90^\circ$ ) düzenlemedekinden önemli düzeyde daha az gerilirler. Bunun nedeni birincide moment kollarında çekme gerilmesiz iletilir. İkincisinde moment kollarında hatırı sayılır düzeyde büyük genlikli saf eğilme gerilmesi biçiminde iletilir. Bu yüzden merkezleme etkisi çok küçük olduğundan, enine (teğetsel) düzenleme ( $a = 0^\circ$ ) kullanılmaz.

-  $a = 60^\circ$  için birleşik gerilme, boyuna ( $a = 90^\circ$ ) düzenlemedekinin sadece % 2'si kadar olup, enine düzenlemedekinden de 2,2 kat kadar daha büyüktür. Birleşik gerilme 9/10 kadar çekme gerilmesi 1/10 kadar da eğilme gerilmesinden oluşur. Sadece  $a = 60^\circ$  kol düzenlemesi önemli derecede olumlu etkiye sahiptir.

- Doğal frekans (Şekil 8)  $a = 10^\circ$  ve  $a = 55^\circ$  aralığında 34,8 Hz. (60 Hz. için) frekans limitinden daha küçüktür, yani "kuvvetlendirme faktörü" bu aralıkta  $v < 1$ 'dir.

$a = 60^\circ$  için  $v = 0,77$  (hatta  $a = 70^\circ$  için  $v = 0,40$ ). Bu temele etkileyen momentte % 23'lük bir azalmaya karşı düşer ( $a = 70^\circ$  için ise % 60'lık bir azalma). Hareketsiz konuma zıt olarak, hareketli durumda temele uygulanan kuvvetlerde azalma için en uygun düzenleme çapsal olmalıdır (yani  $a = 0^\circ$ ). Daha önce de gördük ki ısıl genişleme konusunda bahsedilen nedemeden ve aşın biçimsel bozunmalardan dolayı bu durum tercih edilmez.

### Çapsal Kuvvet

Dışarıdan çapsal bir kuvvet  $F_R$  (Şekil 9) statora (merkez gövde Z) etkirse, her bir eğik kolun bağlantı noktası  $P_n$ ,  $P_n'$  noktasına doğru hareket eder. Yer değiştirme  $P_n P_n' = x$  her bir eğik kol t'de aynıdır. Bu statorun itilmişliğini gösterir. Her bir kolun konumu,  $F$ 'nin konumuna bağlı olarak bir  $\langle F \rangle_n$  açısıyla verilir. Her bir kol  $P_n$  kadar kısalmış (ya da uzamış) ve kol doğrultusuna dik bir  $x_n$  sapması gözlenir. Statorun hareketi itici yönde geliştiğinden bir dönme açısı gözlenmez, t adet eğik kolun çevre boyunca muntazam yayıldığı ve kolların düzenlenmesi gereği  $F_R$  kuvvetinin bakışık etkidiği varsayılmıştır. Bu yüzden,  $F$ 'nin yönü eğik kolunkiyile aynı veya iki komşu eğik kolun arasındaki açıyı ikiye bölen eksen doğrultusundadır. Şekil 9'daki geometriden aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz.

$$x_n/x = \cos(\langle \epsilon_n - \beta \rangle) = \sin(\phi_n + \alpha) \quad (26)$$

$$p_n/x = \sin(\theta_n - \beta) = -\cos(\theta_n + \alpha)$$

ve  $Q_n$  ile  $L_n$ 'nin  $F$  önündeki bileşenleri için;

$$Q_{nf} = Q_n \cos(\phi_n - \theta) = Q_n \sin(\alpha + \theta)$$

$$L_{nf} = L_n \sin(\theta_n - \theta) = -L_n \cos(\theta_n + \alpha) \quad (27)$$

yazabiliriz. Eğik kolların bağlantı noktasında, sabitleme nedeniyle hiçbir dönme açısı olmadığı için kollar hakkında ilk iki denklemden (8)

$$M_n = a \times n$$

$$Q_n = c \times n_l \quad (28)$$

yazılır. Denklem (9) ile

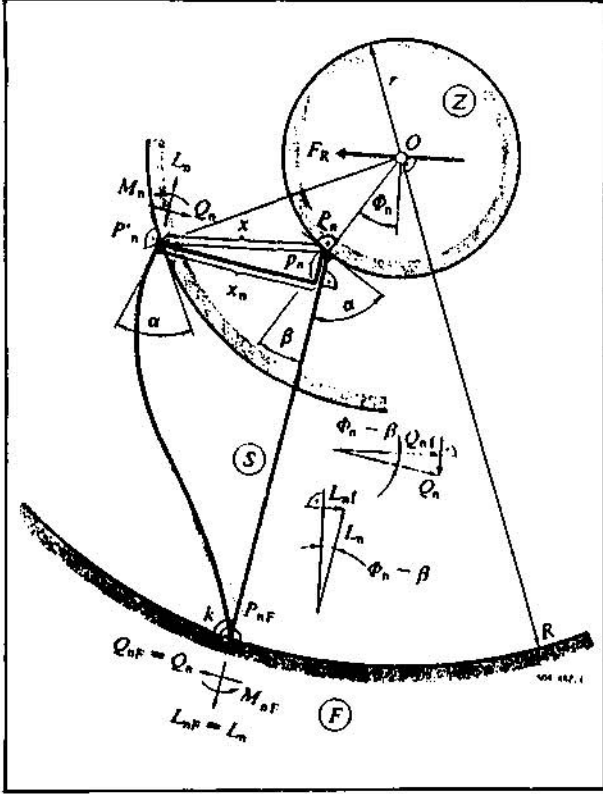
$$L_{nf} = \frac{EA}{s} P_n \quad (29)$$

olacağından; (26), (28) ve (29) denklemlerinin birbirleri yerine konduklarında, denklem (27)'den;

$$Q_{nf} = c \times \sin^2(\theta_n + \alpha)$$

$$L_{nt} = \frac{EA}{s} x \cos^2 (\phi_n + \alpha) \quad (30)$$

elde ederiz.  $F_R$  kuvveti doğrultusundaki statora etkiyen kuvvetlerin dengesi, denklem (30) ile:



ŞEKİL 9. "Çapsal kuvvet" yük şartı.

- $F_R$ : Çapsal (boyuna) kuvvet
- $a$ :  $QS = 90^\circ - a$ : Eğik kol açısı
- $\theta_n$ :  $F_R$  ile ilintili olarak n. kolun konum açısı.
- $x, x_n, p_n$ : Biçimsel bozunmalar ( $x_n$  l  $p_n$ )
- $M_n, Q_n, L_n$ : Eğilme momenti, enine kuvvet, boyuna kuvvet.
- $Q_{nj}$ : FJJ doğrultusundaki  $Q_n$ 'nin bileşeni
- $L_{nj}$ : FR doğrultusundaki  $L_n$ 'nin bileşeni
- $P_n$ : Statordaki sabitleme noktası
- $P_{nj}$ : Temeldeki sabitleme noktası
- (Arta kalan büyüklükler için Şekil 4'e bakınız).

$$\begin{aligned} F_R &= \sum_{n=1}^t Q_{nf} + \sum_{n=1}^t L_{nf} \\ &= x c \sum_{n=1}^t \sin^2 (\theta_n + a) + x \frac{EA}{s} \sum_{n=1}^t \cos^2 (\theta_n + a) \\ &= x c \sum_{n=1}^t \sin^2 (\phi_n + \alpha) + \frac{EA}{s} \sum_{n=1}^t \cos^2 (\phi_n + \alpha) ; \\ \phi_n &= n \frac{360^\circ}{t}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, t \quad (31) \end{aligned}$$

şeklinde yazılabilir, t eğik kol sayısıdır. Momentlerin toplamı bakişiktik nedeniyle yok olur. Çapsal masiflik denilen boyuna doğrultudaki yaylanma sabiti  $E_R$  denklem (31)'e & öre, ^R'den bağımsız olarak,

$$\begin{aligned} E_R &= \frac{F_R}{x} = c \sum_{n=1}^t \sin^2 (\theta_n + a) \\ &+ \frac{EA}{s} \sum_{n=1}^t \cos^2 (\phi_n + \alpha) \quad (32) \end{aligned}$$

şeklinde ifade edilir. Çapsal yer değiştirme x denklem (32)'den hesaplanabilir.

$$x = \frac{F_R}{E_R} \quad (33)$$

O halde statorda kolların P bağlantı noktasındaki gerilmeler aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$\begin{aligned} \sigma_{nD} &= \frac{P_n}{s} E = - \frac{x}{s} E \cos (\theta_n + \alpha) \\ \sigma_{nB} &= \frac{M_n}{W} = \frac{ax_n}{W} = a x \sin (\phi_n + \alpha) \quad (34) \\ \sigma_n &= \frac{Q_n}{A} = \frac{c x_n}{A} = \frac{c x}{A} \sin (\phi_n + \alpha) \end{aligned}$$

Temeldeki bağlantı noktasında sadece eğilme gerilmesi değişir. Bu  $M_{nF} = -M_n + Q_n s$  etkisinde oluşur.

$$\begin{aligned} \sigma_{nBF} &= \frac{M_{nF}}{W} = \frac{-M_n + Q_n s}{W} = \frac{1}{W} [-ax_n + scx_n] = \\ &= \frac{x}{W} (sc - a) \sin (\theta_n + a) \quad (35) \end{aligned}$$

Şekil 10'da, adı geçen makina için çapsal yaylanma sabiti  $E_R$ 'nin a açısına bağlı değişimi çizilmiştir. Bu eğik kollar ile esnek bağlanmış bir statorun merkezleme yeteneğinin ölçütüdür.

"Çapsal kuvvetler" konusundaki hesaplamalar bizi aşağıdaki sonuçlara götürür:

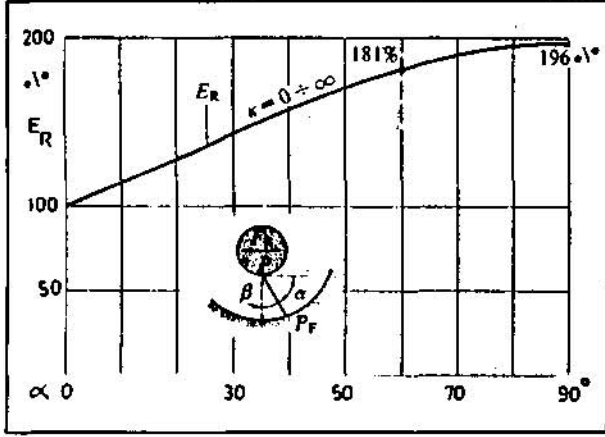
- Kolların çapsal düzenlenmesi (yani  $a = 90^\circ$  koşulu) sonucu kazanılan masiflik, enine düzenlemede ( $a = 0^\circ$ ) elde edilen masifliğin yaklaşık iki (% 100) katıdır.

-  $a = 60^\circ$  için çapsal masiflik, enine düzenlemedekinin 1,81 katıdır ve çapsal düzenlemedekinin % 92'si kadardır. Eğik kol açısı  $a = 60^\circ$  durumu incelendiğinde; bu sonuç, en uygun çapsal düzenleme yöntemindeki merkezleme etkisinden % 8 kadar küçüktür, öte yandan bu



sonuncusu "ısı genleşme" yük koşuluyla eşlenik değildir.

— Sonuçlar uygulamada K'dan yani eğik kolların temele bağlantı türü bakımından bağımsızdır.



ŞEKİL 10. "Çapsal kuvvet" yük şartı.

Kolacısı  $a(\beta=90^\circ - \alpha)$ 'ya bağlı olarak esnek bağlanmış statorun çapsal masifliği  $E_R$ 'nin değişimi. Yaylanma elemanı olarak etki eden eğik kollar yardımıyla esneklik sağlanmıştır.

$E_R$  : Stator merkezleme etkisinin ölçütü.

#### SONUÇ

Eğik kollar veya yaylanma levhaları şeklinde statorun mesnetlenmesinin faydası daha çok ısıl gerilmeleri hatırı sayılır mertebede azaltılması yönündedir. Bu çeşit bir mesnet, bir yandan stator magnetik devredeki yanıl eğilmeleri önlerken diğer yandan da temeldeki çatlamaları engeller. Bundan başka, kararlı çalışma (sabit) momenti, yaylanma levhaları ile, alelade yani çapsal düzenlemelere ( $\alpha = 90^\circ$ ) nazaran daha düşük gerilmeler ile iletilir.

Eğik yaylanma levhalarının merkezleme etkisi, büyüklük itibarıyla, çapsal düzenlemedekinden ( $\alpha = 90^\circ$ ) çok az küçüktür. Hem kararlı hal işletmesinde hem de bir rotor kısa devresi sonucunda (nadiren gerçekleşir). Geçici hal işletmesinde, rotor stator arası hava aralığını korumak için iyi bir merkezleme etkisine ihtiyaç vardır. Stator kısa devresi (nadiren gerçekleşir) durumda, eğik kol düzenlemesi yeterli mekanik yalıtımı gerçekleştirir. Kısa devre kuvvetlerinin tümünü temele iletmez. Yaylanma elemanlarının çapsal (boyuna) düzenlenmesi "çapsal kuvvet" yük şartı (merkezleme) için en iyi çözüm iken bunların enine (teğetsel) düzenlenmesi "ısı genleşme" yük şartı için en iyi çözümdür. Geçici hal işletmesi durumunda yaylanma levhalannın çapsal olarak düzenlenmesi en iyi çözüm iken, kararlı hal işletmesi durumunda "moment" yük şartı için en uygun çözüm enine düzenlemedir. Yaylanma elemanları için  $\alpha = 60^\circ$  eğim; çözüm olarak, en uygun sonucu vererek bize uygulanabilir bir uzlaşma sunar.

#### KAYNAKLAR

- (1) W. Kellenserger: Lateral buckling of stator laminations due to thermal stresses in large hydro-generators. BBC Rev. 53, 1966 (9\*), 538-545.
- (2) M. Sitarcevic: Swiss Patents No. 578708, 578795, 591043, 5941311.
- (3) K. Baltisberger: Kraftwerksgeneratoren. ETG-Fachberichte 3 19^7, 83-89, VDE-verlag, Berlin.
- (4) K. Baltisberger, M. Canay, Y. Voegelé, M. Wimmer: Motor-generators for pumped storage schemes. BBC Rev. 65, 1978 (6), 280-291.
- (5) Synchronous machines for hydro-electric power plants. Publication No. CH-T 130082E.
- (6) E. Wiedemann, W. Kellenberger: Konstruktion elektrischer Haschinen, Springer 1967, S. 581.