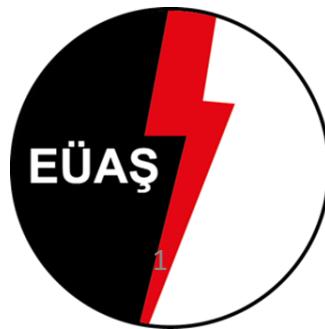
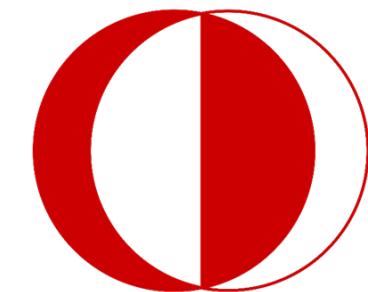


ODTÜ-EÜAŞ EGEN Projesi Eğitim İçerikleri

Hidro-generatörler için Bobin Tasarımı

Nail Tosun



Tanıtım



Nail Tosun

Research Assistant, Msc. Candidate
nail.tosun@metu.edu.tr
<http://nailtosun.me/>

Middle East Technical University

METU Power Lab
<http://power.eee.metu.edu.tr/>



Eğitim

Doktora: ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, (2021-?)

Yüksek Lisans: ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Güç Elektroniği ve Elektrik Makinaları Tasarımı (2019-2021)

Tez başlığı: *Transient Modeling Techniques for the Analysis of Electromagnetic Launchers*

Lisans: ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (2014-2019)

Araştırma Alanları

Elektrik Makinaları Tasarımı

Elektromanyetik Sonlu Eleman Analizleri

Multifizik Optimizasyon

Güç Elektroniği

Yenilenebilir Enerji

İçerik

Elektrik Makinalarında Sargı Tasarımı

Sargı Şeması Tasarımı

1. Sargı Faktörleri
2. Tam Sayı, Kesirli Sargı Şemaları
3. Sargı Şeması Okuma
4. İleri Seviye Sargı Tasarımları

Fiziksel Bobin Tasarımı

1. Sargı Yapısı (Bükümlü, Dalgalı)
2. Paralel Faz Sargıları
3. Bakır Doluluk Oranı
4. İzolasyon
5. Yan Ekipmanlar

Sağı Faktörleri

Neden önemli? Enerji dönüşümü verimliliğini etkiler.

Mekanik güç
İkazdan sağlanan manyetik akı

$$\frac{d\Phi}{dt} \xrightarrow{k_w} \text{Endüklenen gerilim}$$
$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi f N k_w \Phi_p$$

Tipik değerler:

>0.95

0.9 < k_w < 0.95

Harmonik eliminasyonu yapılacaksa

Sargı Faktörleri

İki tip sargı faktörü bulunmaktadır.

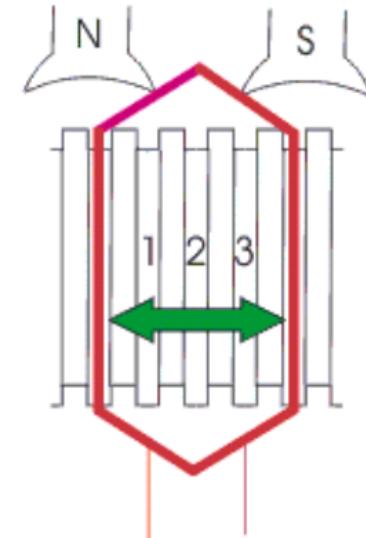
Kd: Distribution factor

Kp: Pitch factor

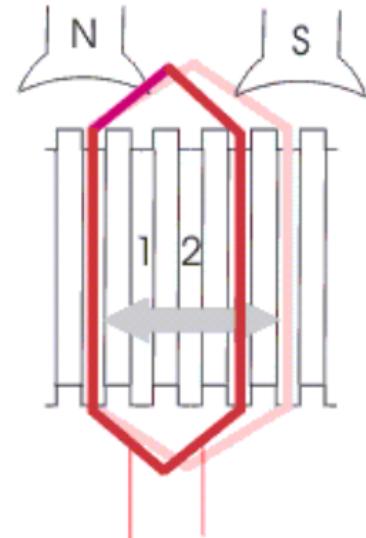
$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 + \mathbf{e}_3$$

Hesaplama yöntemleri:

1. Dolamites (açık kaynak)
2. Excel (AHGM)
3. Analitik
4. Maxwell 2D/Rmxprt



Multi turn Full Pitched Coil



Multi turn Short Pitched Coil

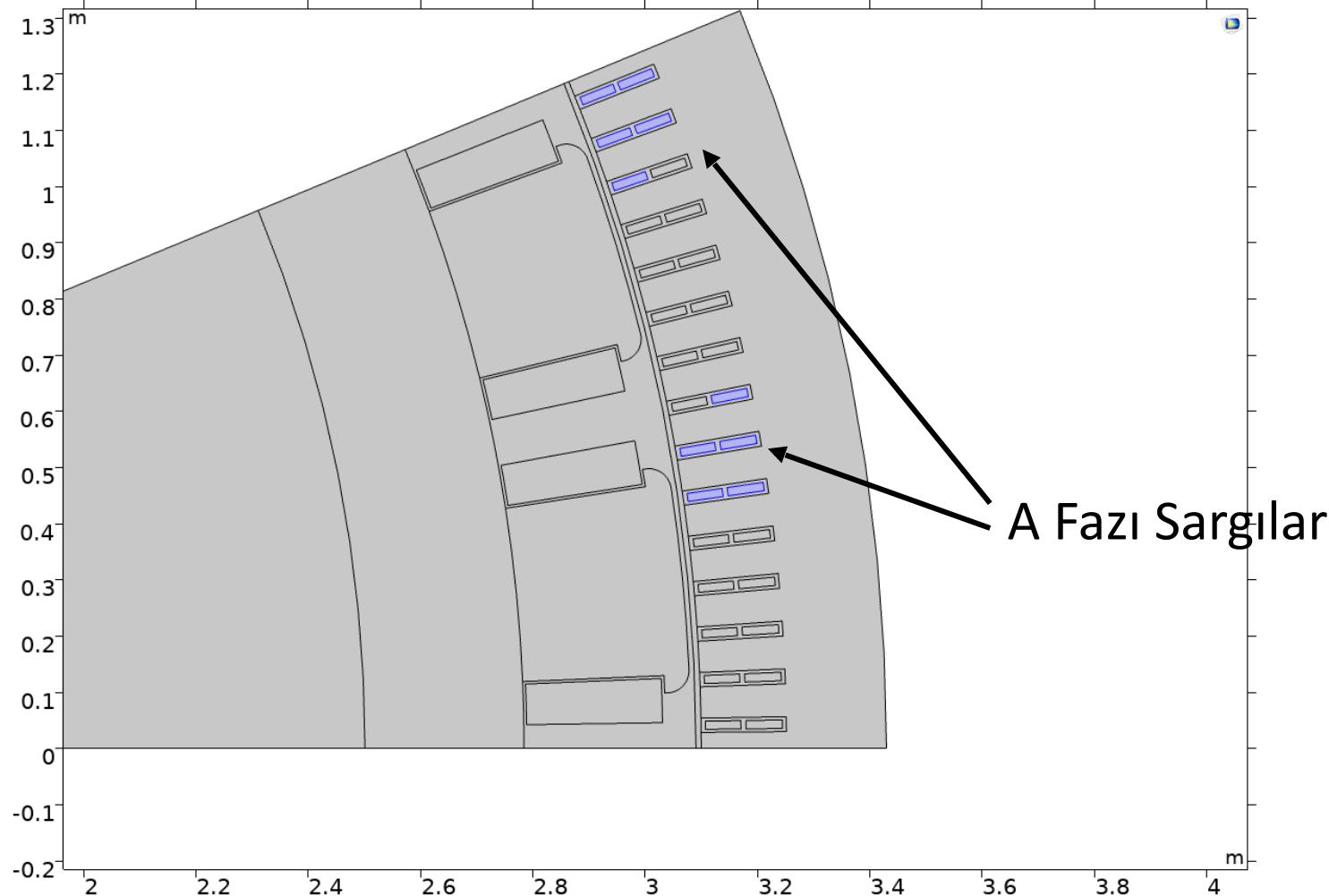
$$k_d = \frac{\sin\left(qn\frac{\alpha}{2}\right)}{q \times \sin\left(n\frac{\alpha}{2}\right)}$$

$$k_p = \sin\left(n\frac{Th\pi}{2qm}\right)$$

$$k_w = k_d \times k_p$$

Sargı Faktörleri – Sonlu Eleman Analizi

Sonlu eleman analizi modelinde sargıları modellemişse endüklenen gerilimi k_w ile çarpmanıza gerek yok.



Fakat sargıların doğru
yerleştirildiğinden emin
olmak gereklidir.

Tam Sayı Sargı Faktörleri

q değerinin tam sayı olduğu sargı çeşididir.

$$q = \frac{Q}{2pm}$$

Q : Toplam ankuş sayısı
 p : Kutup çifti sayısı
 m : Faz sayısı

Slot açısı: $\theta_u = \frac{\pi 2p}{Q}$
 $\theta_u = 15^\circ$

$$Q = 384, p = 16, m = 3, q = 4$$

Ankuş Numarası											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	A	A	A	"-C"	"-C"	"-C"	"-C"	B	B	B	B
A Fazı Bandı				C Fazı Bandı				B Fazı Bandı			

60° 60° 60°

Tam Sayı Sargı Faktörleri

q değerinin kesirli olduğu sargı çeşididir.

$$q = \frac{q_1}{q_2} = \frac{5}{2}$$

$$q = \frac{Q}{2pm}$$

$$Q = 240, p = 16, m = 3, \mathbf{q = 2.5}$$

$$\theta_u = \frac{\pi 2p}{Q} \quad \theta_u = 24^\circ$$

	A Fazı Bandı					C Fazı Bandı					B Fazı Bandı				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
p1	1	2	3	4	5	3	4	5			6		7		8
p2		9	10		11		12		13		14		15		

$$\theta_u = 24^\circ$$

Faz bandı (60°) oluk açısının tam katı olmadığı için taşıma göstermektedir.

Adım sayısı

Sargı adımı değişikçe harmonik profili değişmektedir.

Sargı Adımı: 12

N kutbu												S Kutbu											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	"-C"				B				"-A"				C				"-B"						
A	"-C"				B				"-A"				C				"-B"						

Sargı Adımı: 13

N kutbu												S Kutbu											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	"-C"				B				"-A"				C				"-B"						
	A				"-C"				B				"-A"				C						
	A				"-C"				B				"-A"				C						

Sargı Adımı: 14

N kutbu												S Kutbu											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	"-C"				B				"-A"				C				"-B"						
	A				"-C"				B				"-A"				C						
	A				"-C"				B				"-A"				C						

Tam Sayı - Kesirli Sargı Şeması Karşılaştırması

Tam Sayı Sargı Şeması

Vuruntu momenti daha çok



Mekanik titreşim problemleri

Harmonik eliminasyonu limitli



Gerilim dalga şekli problemleri

Kesirli Sargı Şeması

Vuruntu momenti daha az

**Bağlantı sargıları (end-winding)
daha kısa**



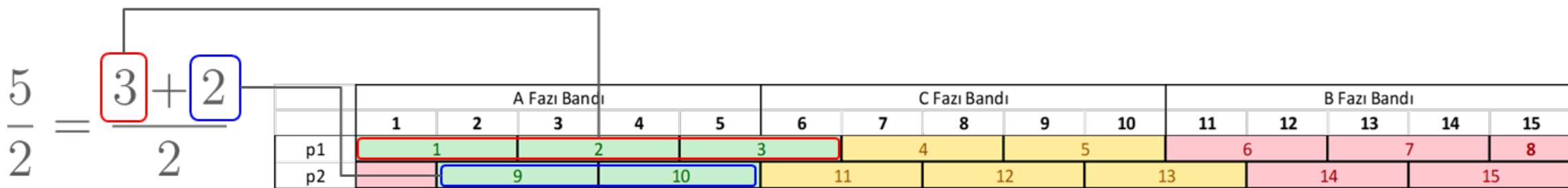
Daha az bakır kaybı

Sargı şeması daha kompleks

Kesirli Sargı Faktörleri

$$q = \frac{q_1}{q_2} = \frac{5}{2}$$

A fazı sargı dizisi: 3-2-3-2-3-2
Sargı dizisi: 3-2-3-2-3-2



Ankuş Numarası														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	A	A	"-C"	"-C"	B	B	B	"-A"	"-A"	C	C	C	"-B"	"-B"

Sarginin ikinci tabakası adım sayısı (throw) değerine göre dizilmektedir.

Kesirli Sargı Faktörleri

$$\theta_u = 24^\circ$$

$$th = 7$$

$$\theta_p = 168^\circ$$

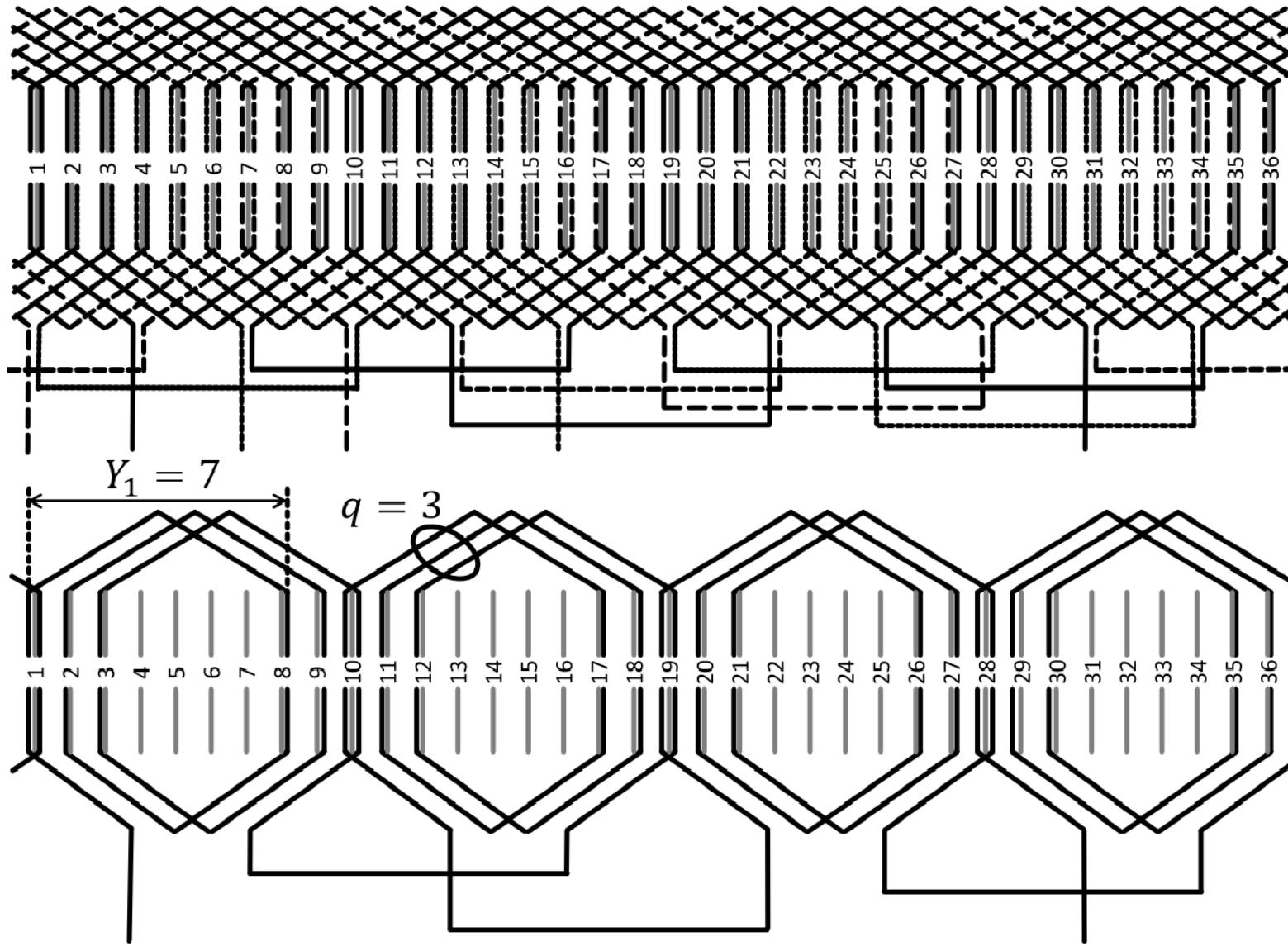
Kısa adım yapabilmek için minimum iki tabakaya ihtiyaç vardır.
Adım sayısı kadar birinci tabakadaki sargılar ikinci tabakaya kaydırılır.

$$Q = 240, p = 16, m = 3, q = 2.5$$

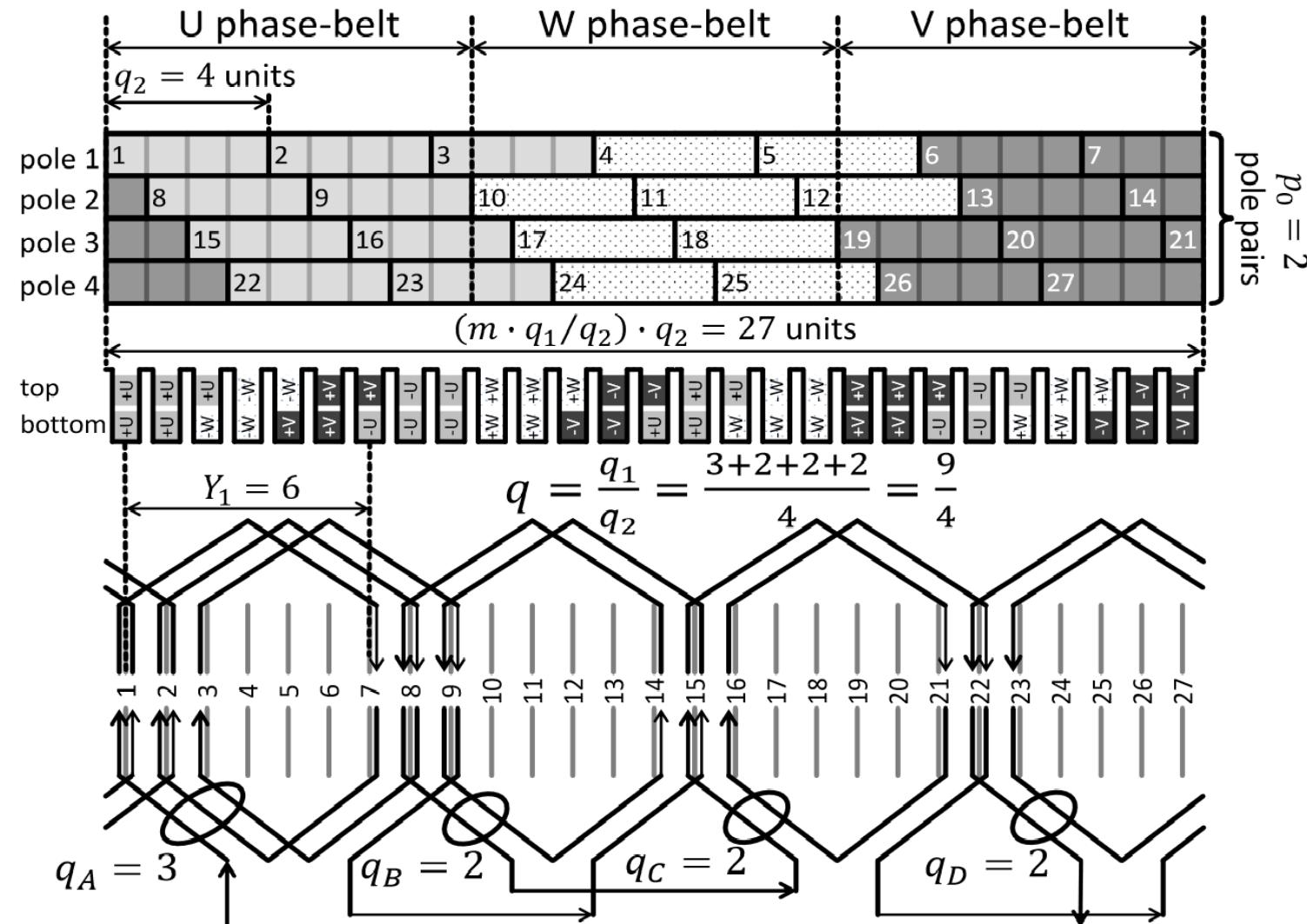
Ankuş Numarası														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	A	A	"-C"	"-C"	B	B	B	"-A"	"-A"	C	C	C	"-B"	"-B"
							"-A"	"-A"	"-A"					

Ankuş Numarası														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	A	A	"-C"	"-C"	B	B	B	"-A"	"-A"	C	C	C	"-B"	"-B"
A	A	"-C"	"-C"	"-C"	B	B	"-A"	"-A"	"-A"	C	C	"-B"	"-B"	"-B"

Sargı Şeması Okuma



Sargı Şeması Okuma



İleri Seviye Tasarım: Zone Pitching

$q = 4$, full pitch 1-13-25

N kutbu												S Kutbu											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A				"-C"				B				"-A"				C							"-B"
A				"-C"				B				"-A"				C							"-B"

$q = 4$, long pitch 1-15-25

N kutbu												S Kutbu											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A				"-C"				B				"-A"				C							"-B"
	A				"-C"			B				"-A"				C							

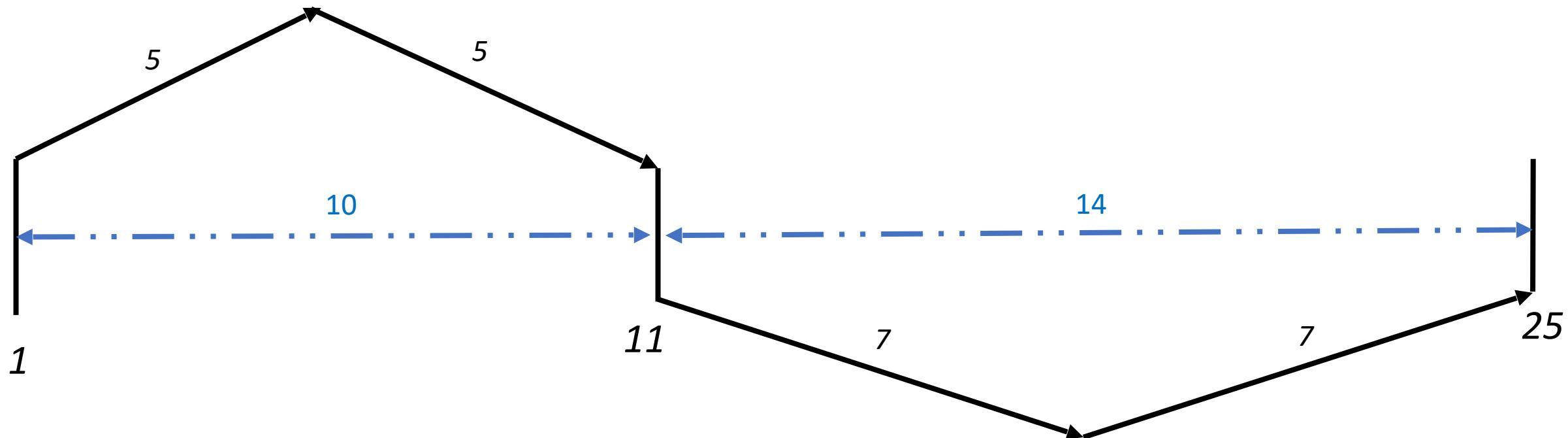
$q = 4$, short pitch 1-11-25

N kutbu												S Kutbu											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A				"-C"				B				"-A"				C							"-B"
		"-C"		B				"-A"				C				"-B"							

İleri Seviye Tasarım: *Zone Pitching*

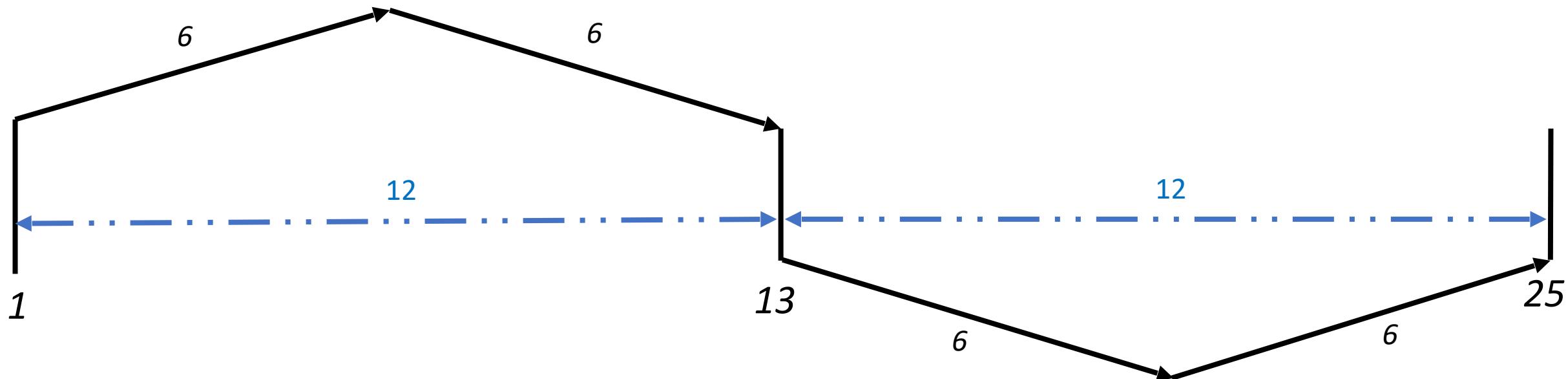
q = 4 , short pitch 1-11-25

N kutbu												S Kutbu											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	"-C"				B				"-A"				C				"-B"						
	"-C"				B				"-A"				C				"-B"						



İleri Seviye Tasarım: Zone Pitching

N kutbu												S Kutbu											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A							"-C"			B				"-A"				C					"-B"
	A						"-C"			B				"-A"			C						



İleri Seviye Tasarım: Zone Pitching

Neden önemli?

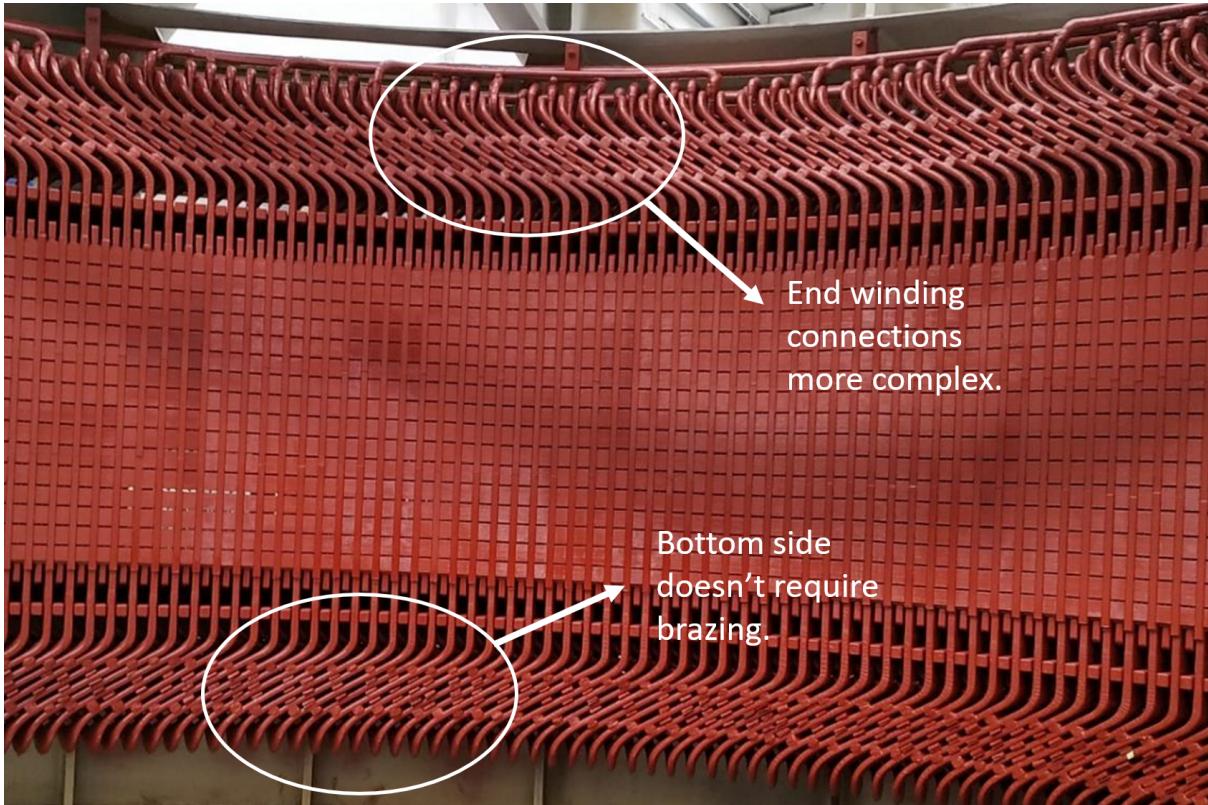
Eğer yapı uygunsa kısa-uzun bağlantılar yapmadan *short-pitch* yapılmasını sağlar.

Short pitch: Harmonikler azaltılır.

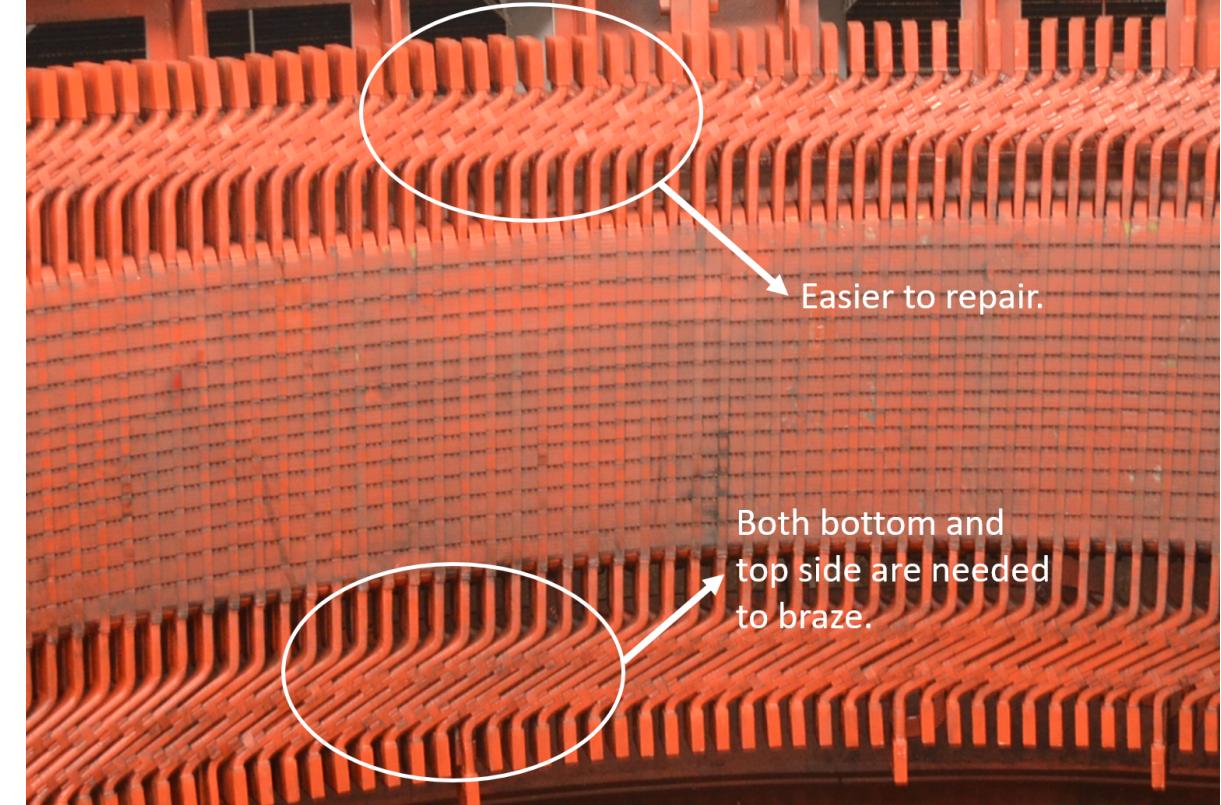
Tek tip açık sargı üretilir.

İlusu HES örneği..

Sargı Yapısı (Bükümlü, Dalgalı)

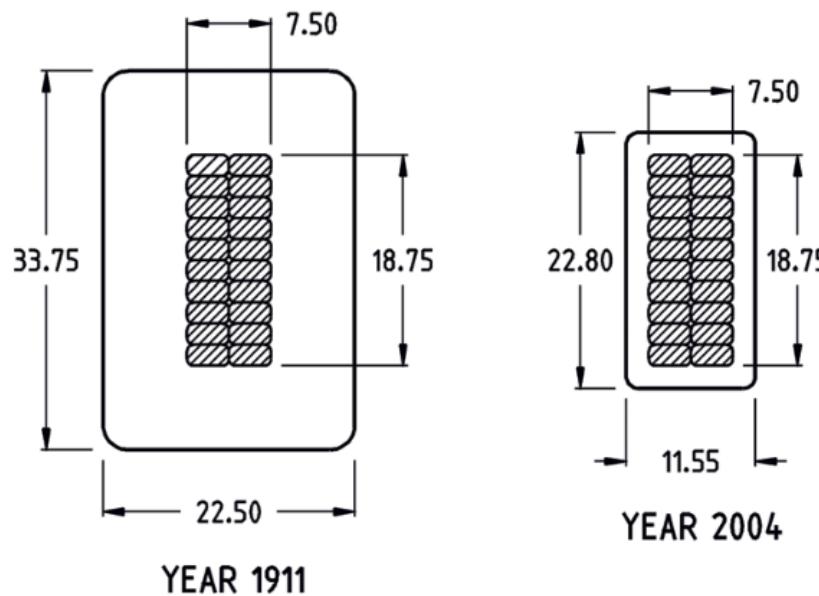
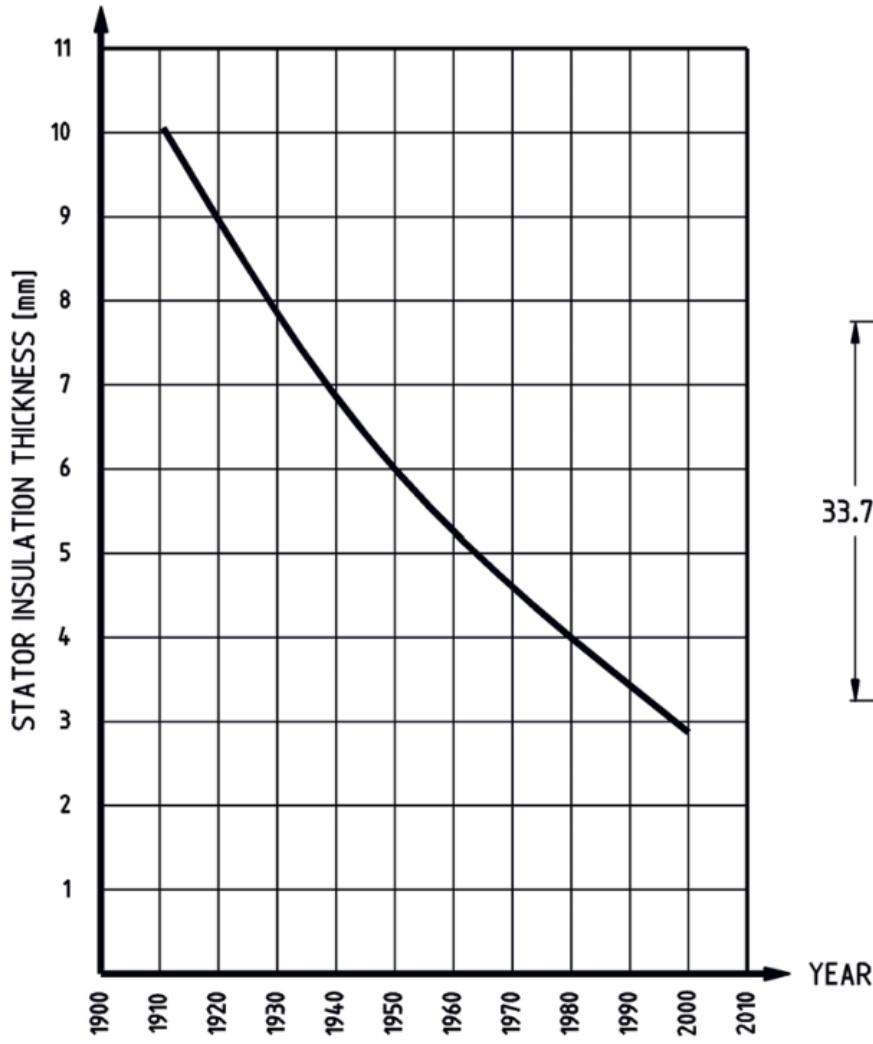


Bükümlü



Dalgalı

Bakır Doluluk Oranları



Ne kadar bakır o
kadar iyi.

Neden?

Bobin Tasarımındaki İlerlemeler

1964 DESIGN

120 MVA/14.4 kV

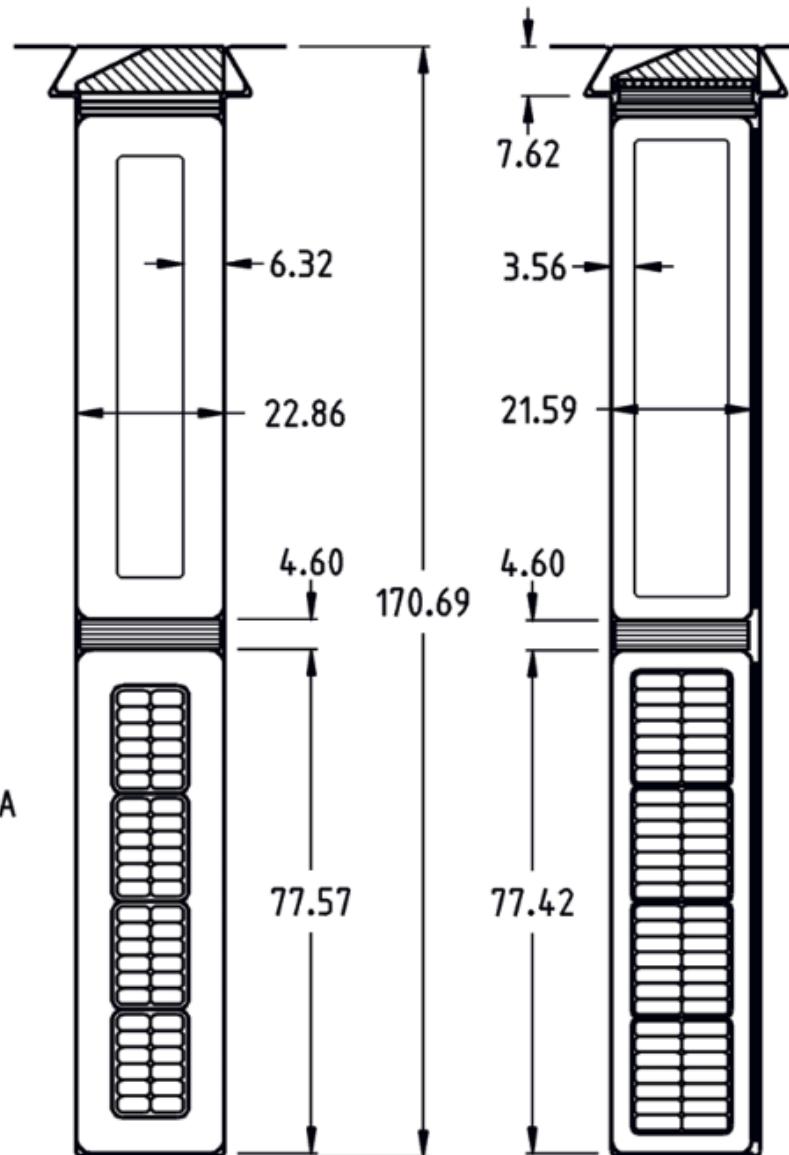
COPPER WIRE IN TURN
12 (4.93×2.34) mm
 131.35 mm^2

GROUND INSULATION
THICKNESS 6.32 mm

VOLTAGE STRESS
IN GROUND INSULATION
1358 V/mm

TOTAL STATOR WINDING
COPPER LOSSES AT 120 MVA
357.988 kW

STATOR WINDING
TEMPERATURE RISE
AT 120 MVA
73.76°C



2007 DESIGN

165 MVA/14.4 kV (37.5% UP RATE)

COPPER WIRE IN TURN
14 (6.99×2.16) mm
 205.87 mm^2 (56.72% CSA INCREASE)

GROUND INSULATION
THICKNESS 3.56 mm

VOLTAGE STRESS
IN GROUND INSULATION
2480 V/mm

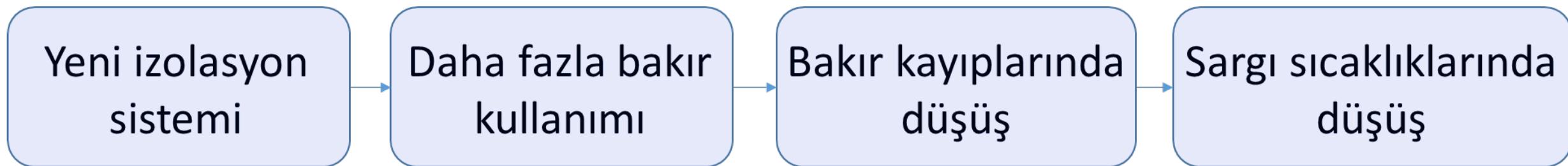
TOTAL STATOR WINDING
COPPER LOSSES AT 165 MVA
466.912 kW (30.43% INCREASE)

STATOR WINDING
TEMPERATURE RISE
AT 165 MVA
72.43°C

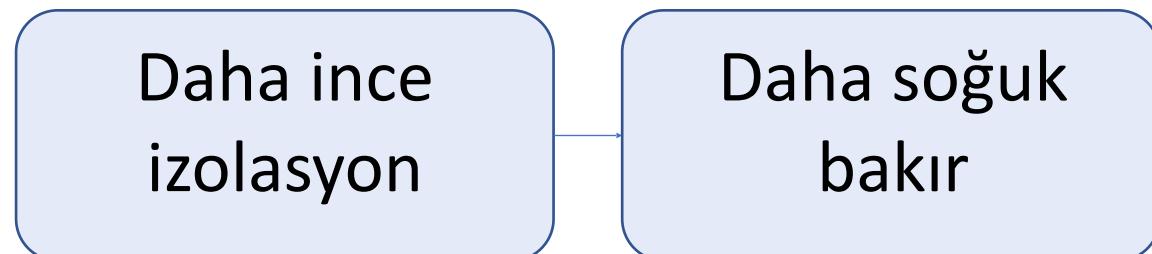
Yeni Bir Bobin Tasarımında Elde Edilebilecekler

11 kV'luk bir orta gerilim generatör sargısında:

- Nötr izolasyon kalınlığında 4.6 mm'den 2.48 mm'e düşüş (yaklaşık %50)
- Tur izolasyonlarının ekarte edilmesi. (spir izolasyonların yeterli olması)
- Sargıdaki bakır oranını artırarak kayıpları azaltma.



İzolasyon malzemelerinin bakıra göre termal iletkenlikleri oldukça düşüktür.



Bobin Yenilenmesi

Sargılarda gerçekleştirilen iyileştirmeler:
İzolasyon malzemesindeki değişim

Thermoplastic (30-50 yıl öncesi) **syntetic epoxy resin** (güncel trend)

- Izolasyon daha da incelmıştır.
- VPI gibi teknolojiler ile izolasyon malzemeleri daha yoğun olmuştur. (daha az hava boşluğu, partial discharge riski azalmıştır.)
- Daha homojen yapı.
- Termal iletkenlik, ısı atma performansında artış.
- Daha düşük sıcaklıklar.
- Class B'den ($130\text{ }C^\circ$) Class F'e geçiş ($155\text{ }C^\circ$)

Wedge

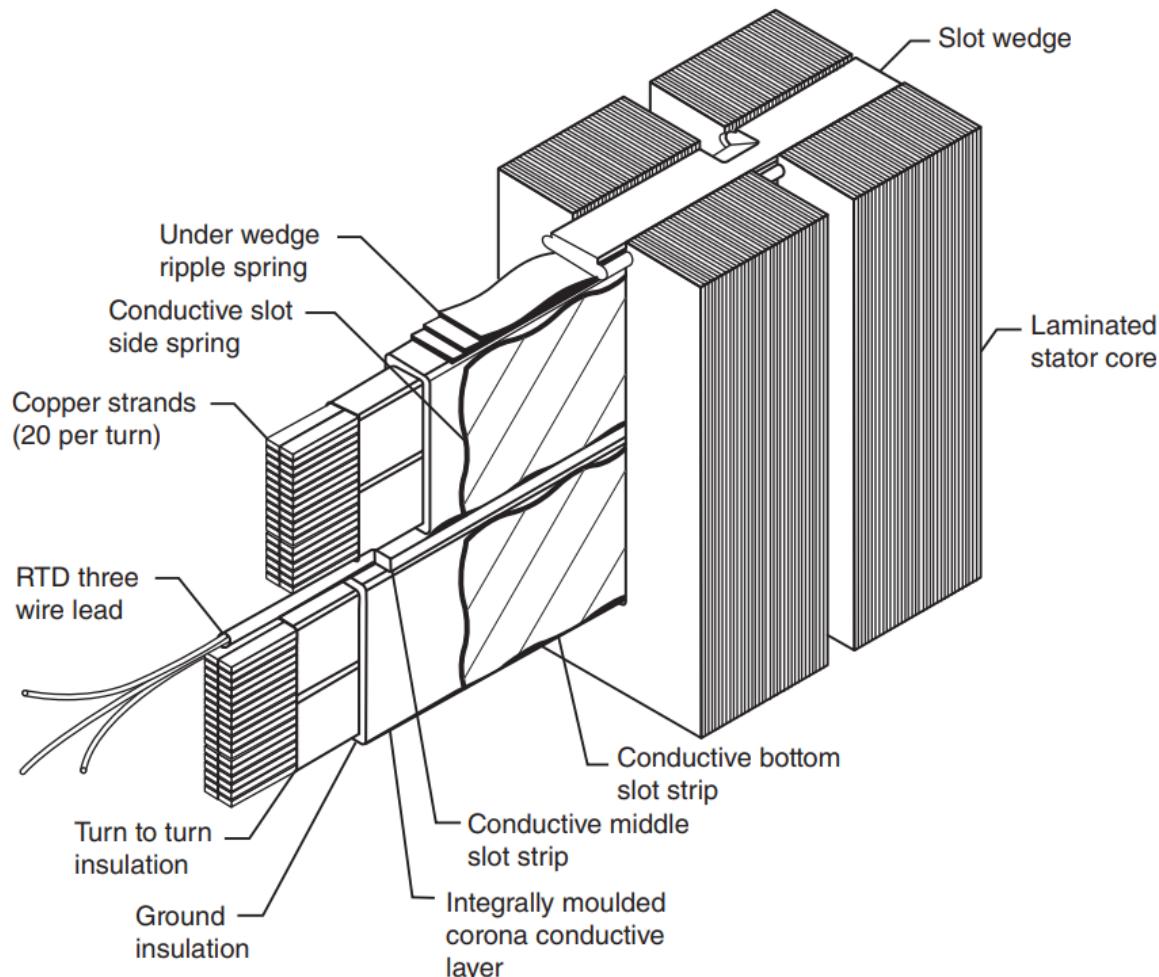


Figure 2.7-5 Shows a two turn bar in the stator slot (teeth are adjacent to bar). Source:
Courtesy of Dr. Michael Znidarich & Engineers Australia [3].

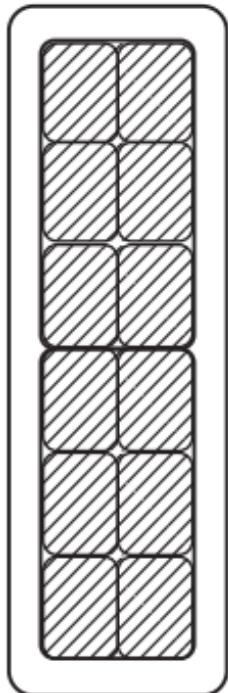
Wedge önemi: Stator barlarının gevşek olması durumunda titreşim başlar. Bu titreşim *groundwall* izolasyonun kazınmasına/kaybolmasına sebep olabilir.

Wedge kullanılmasındaki diğer bir sebep:
thermal expansion and contraction

Mekanik sistem fazdan faza kısa devre anında oluşacak kısa devre akımlarına 30 sn dayanabilecek şekilde tasarılanmalıdır.

Neden Spir Kullanılır?

Case 1

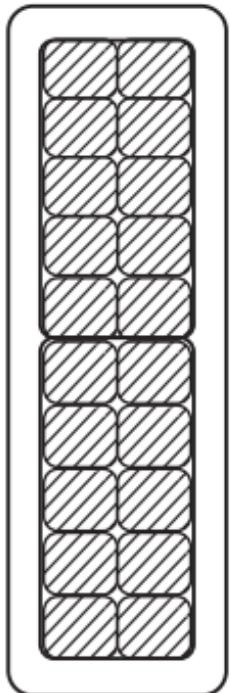


2 Turns/coil

6 Strands/turn

5.40 mm × 7.70 mm

Case 2

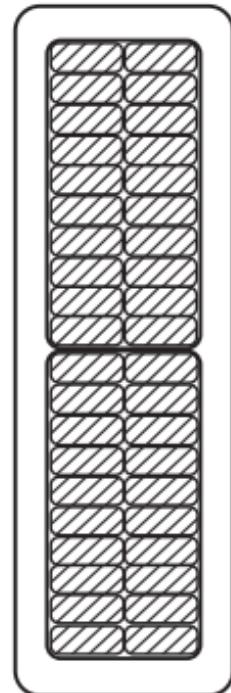


2 Turns/coil

10 Strands/turn

5.40 mm × 4.50 mm

Case 3



2 Turns/coil

20 Strands/turn

5.40 mm × 2.10 mm

Hangi sargının bakır
kayıbı daha az?

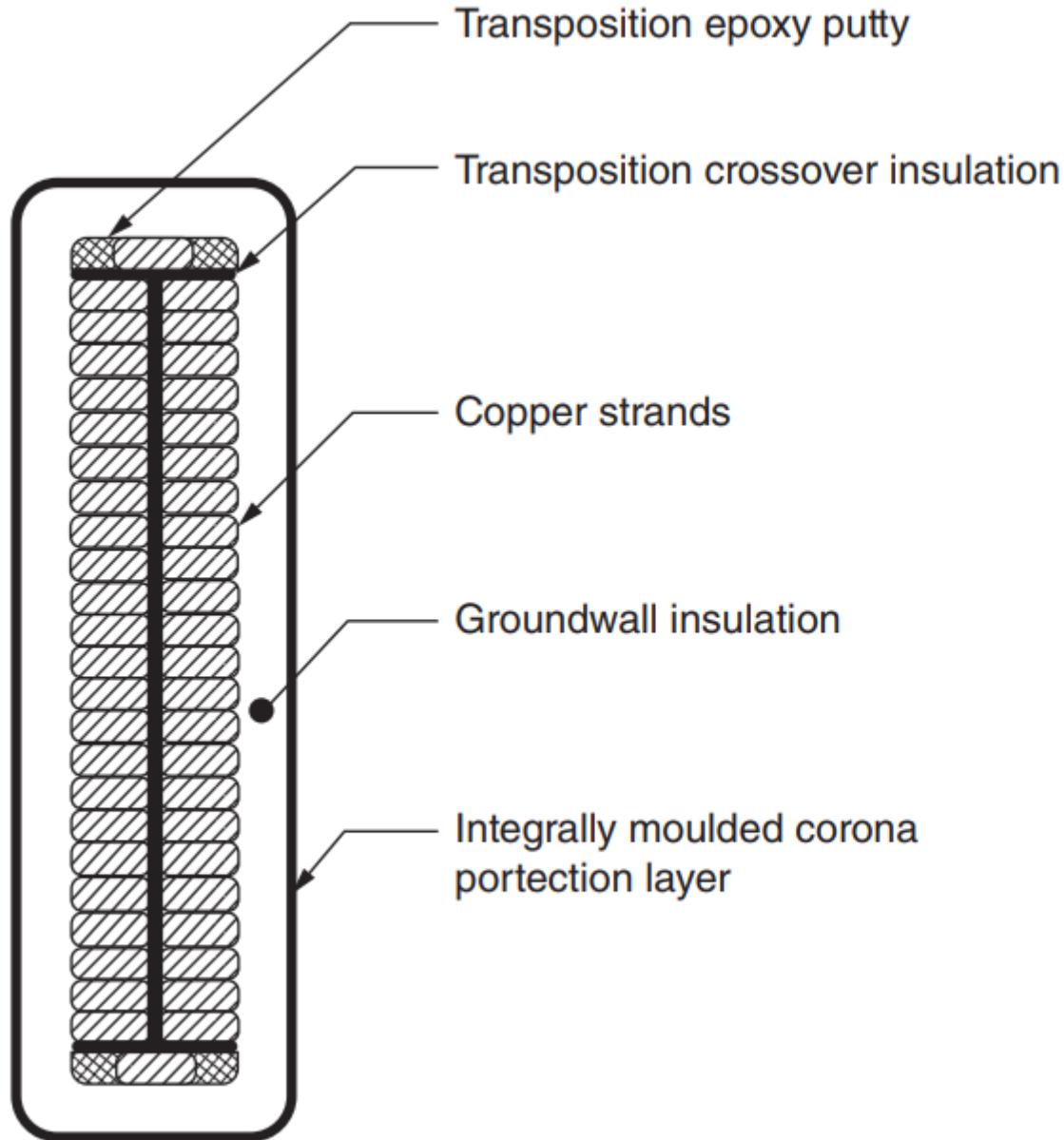


Figure 2.7-2 Typical single turn Roebel bar configuration. *Source:* Courtesy of Dr. Michael Znidarich & Engineers Australia [2].

Transpozisyon

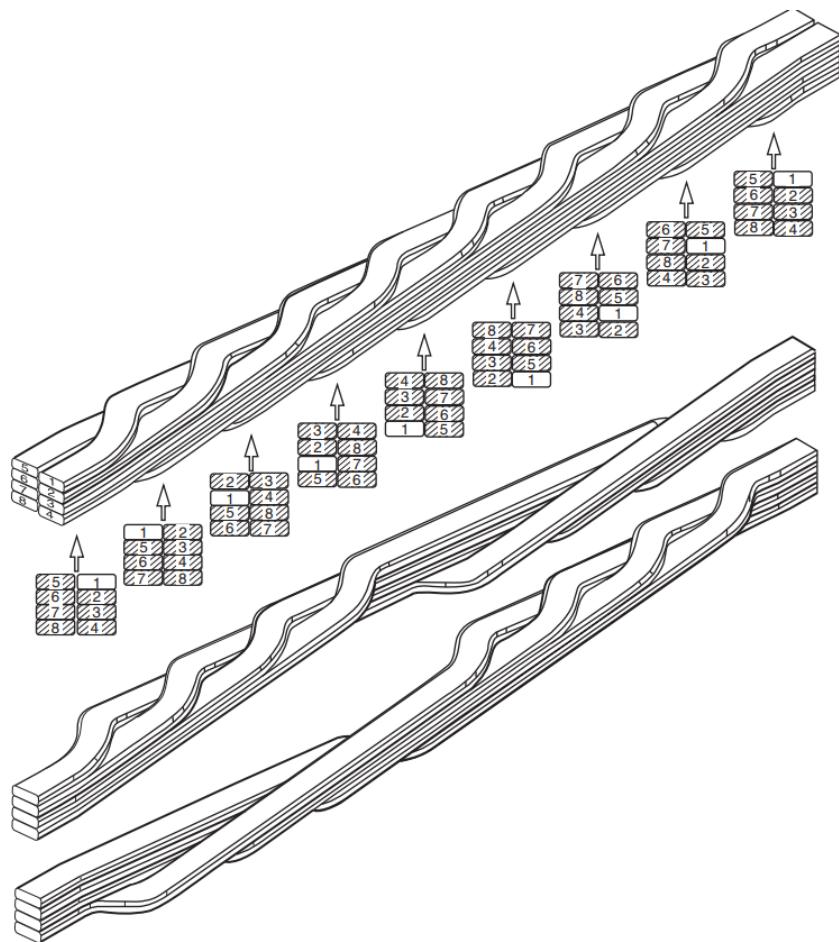


Figure 2.7-11 Roebel transposition 3D view. Source: Courtesy of Dr. Michael Znidarich & Engineers Australia [4].

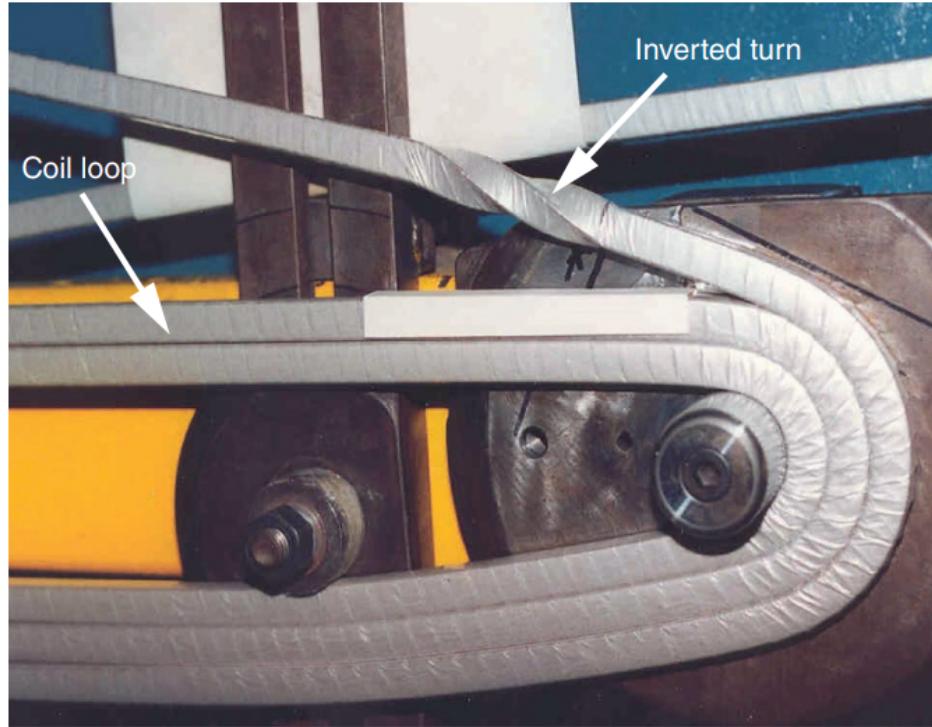


Figure 2.7-10 Looping of a coil with inverted turn. Source: Courtesy of Dr. Michael Znidarich & Engineers Australia [4].

Yan Ekipmanlar

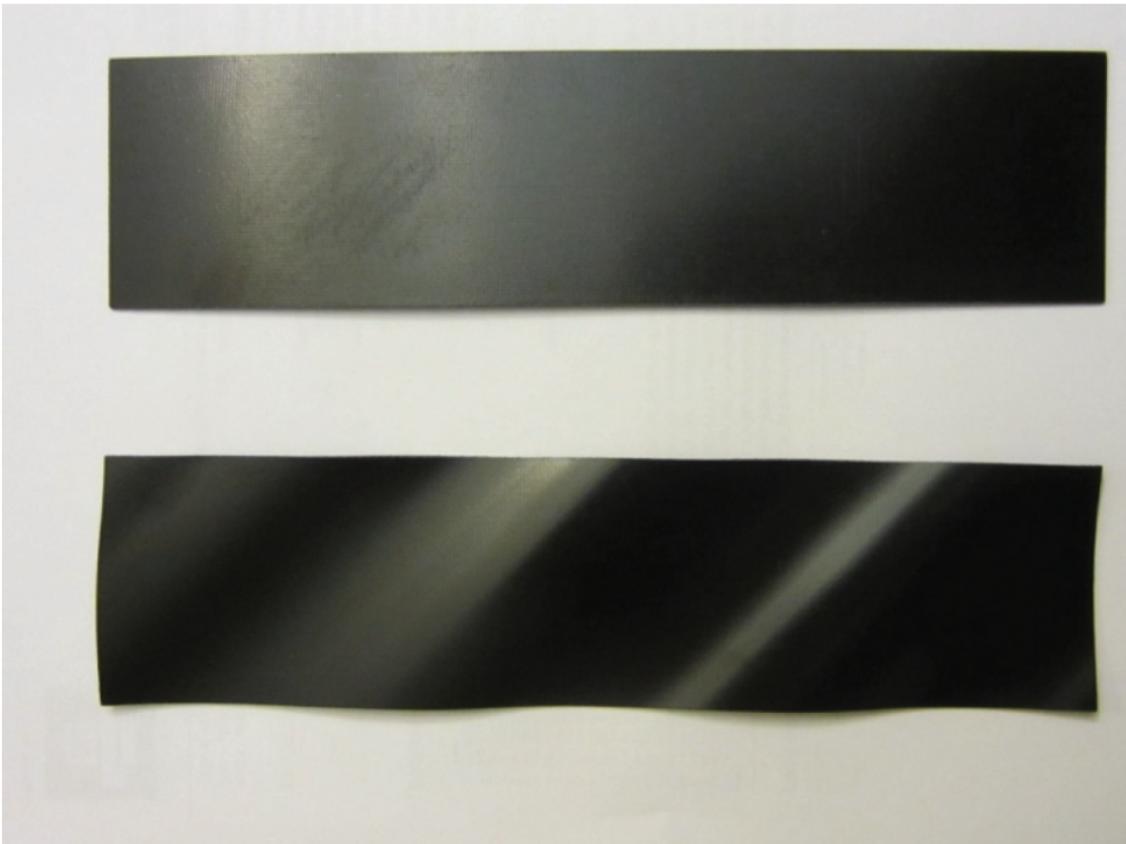


Figure 2.7-19 Flat side-packing (top) and ripple spring (bottom) with semiconducting impregnation.

Neden kullanılır?

Neden yarıiletken?

$$F_{\text{total}} = \frac{4\mu_o I^2}{w_s k^2} \text{ N/m}$$



Figure 8.8-3 Shows center filler migrating out the bottom of the winding.

Örnek Tasarım: Sarıyar 3. Ünite (Westinghouse)

Örnek Tasarım: Sarıyar 1. Ünite (AEG)