

Güç Faktörünün düzeltilmesi

Enerji dağıtım firmalarının tüketici tesislerde;

- Enerji iletim sistemlerinin elemanlarının (Transformator, kesici, baralar, vb.) ve iletkenlerinin kesitlerinin aşır boyutlandırılmasını önlemek,
- Hatlarda daha yüksek joule kaybını ve yüksek gerilim düşümlerini önlemek amacıyla

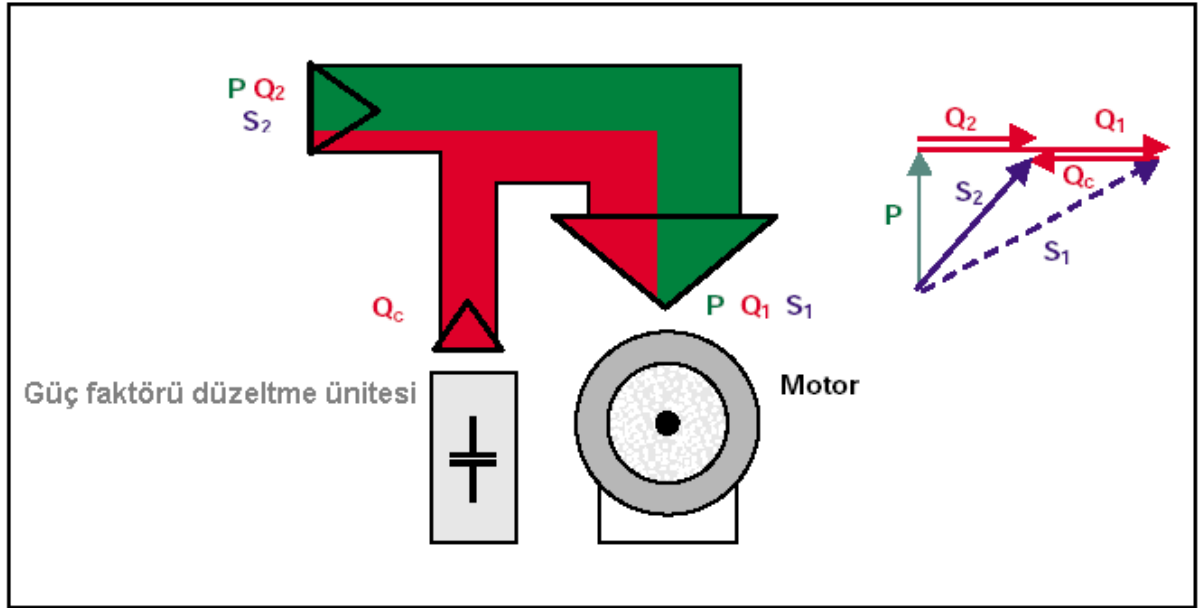
Güç faktörünü düzeltme tesisinin yapılmasını şart koşmuştur.

Gerekli Kompanzasyon Gücünün hesabı için Metodlar

1. Basit Metod

Sinusoidal dalga şeklinde $\cos \varphi_1$ den $\cos \varphi_2$ ye geçmek için gerekli reaktif gücün miktarını veren ifade

$$Q_c = Q_2 - Q_1 = P [\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2] \quad (1)$$



P Aktif güç

Q_1, φ_1 Güç faktörü düzeltilmeden önceki çekilen reaktif güç ve güç faktörü

Q_2, φ_2 Güç faktörü düzeltildikten sonra çekilen reaktif güç ve güç faktörü

Q_c Güç faktörünü düzeltmek için gerekli kapasitif reaktif güç

$$K_c = \frac{Q_c}{P} = \tan \varphi_1 - \tan \varphi_2 \quad (2)$$

$$Q_c = K_c \cdot P \quad (3)$$

K_c	$\cos\varphi_2$												
$\cos\varphi_1$	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484

Tesislerde sıklıkla kullanılan cihaz ve ekipmanlara ait ortalama güç faktörü değerleri

Tesis ve cihazlar			cos φ	tan φ
Asenkron motorlar	Yükleme	0%	0.17	5.80
		25%	0.55	1.52
		50%	0.73	0.94
		75%	0.80	0.75
		100%	0.85	0.62
Akkor telli lambalar			1.0	0
Fluoresan lamba(kompanzasyonsuz)			0.5	1.73
Fluoresan lamba(kompanzasyonlu)			0.93	0.39
Deşarj lambaları			0.4 – 0.6	2.29 – 1.33
Rezistanslı fırınlar			1.0	0
Endüksiyonla ısıtmalı fırınlar(kompanzasyonlu)			0.85	0.62
Mikrodalga fırınlar			0.85	0.62
Rezistanslı kaynak makinaları			0.8 – 0.9	0.75 – 0.48
Sabit 1 faz ark-kaynağı			0.5	1.73
Ark kaynağı motor-generator set			0.7 – 0.9	1.02 – 0.48
Ark kaynağı transformatör-doğrultucu set			0.7 – 0.8	1.02 – 0.75
Ark ocakları			0.8	0.75

Örnek:

$U_N = 400V$ ve 300 kW ortalama bir güç çeken 3-fazlı sistemde güç faktörü 0,8 den 0,93 e çıkartılmak istenmektedir.

K_C tablodan 0,355 olarak bulunur.

$Q_C = K_C \cdot P = 0,355 \cdot 300 = 106,5kVAR$ bulunur.

Güç faktörünün düzeltilmesinden dolayı çekilen akım 540 A den 460 A e azalmaktadır.

Azalma miktarı %15 dir.

2. Elektrik Faturasına göre

Gerekli Kompanzasyon gücü

$$Q_c = \frac{Q(\text{faturadaki cezalı reaktif enerji miktarı kVARh})}{h(\text{İşletme süresi saat})} \quad (4)$$

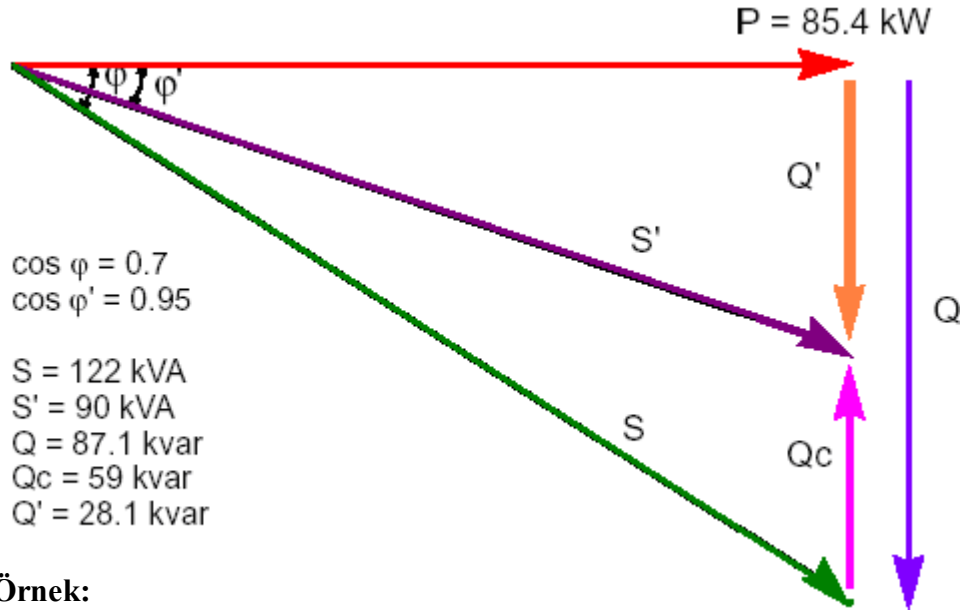
Örnek:

$Q = 18000 \text{ kVARh}$

$h = 22 \text{ gün} \times 12 = 264 \text{ saat}$

$$Q_c = \frac{18000 \text{ kVARh}}{264} \approx 60 \text{ kVAR}$$

3. Açıklanan Görünen Gücün Azaltılması Esasına Dayanan Metod



Örnek:

Bir işyerinde açıklanan görünen güç 122kVA ve güçfaktörü 0,7 dir.Çekilen aktif güç ise 85,4 kW dır. Aktif güç sabit tutularak görünen gücü değiştirmek suretiyle güç faktörü 0,7 den 0,95 e çıkarılacaktır.

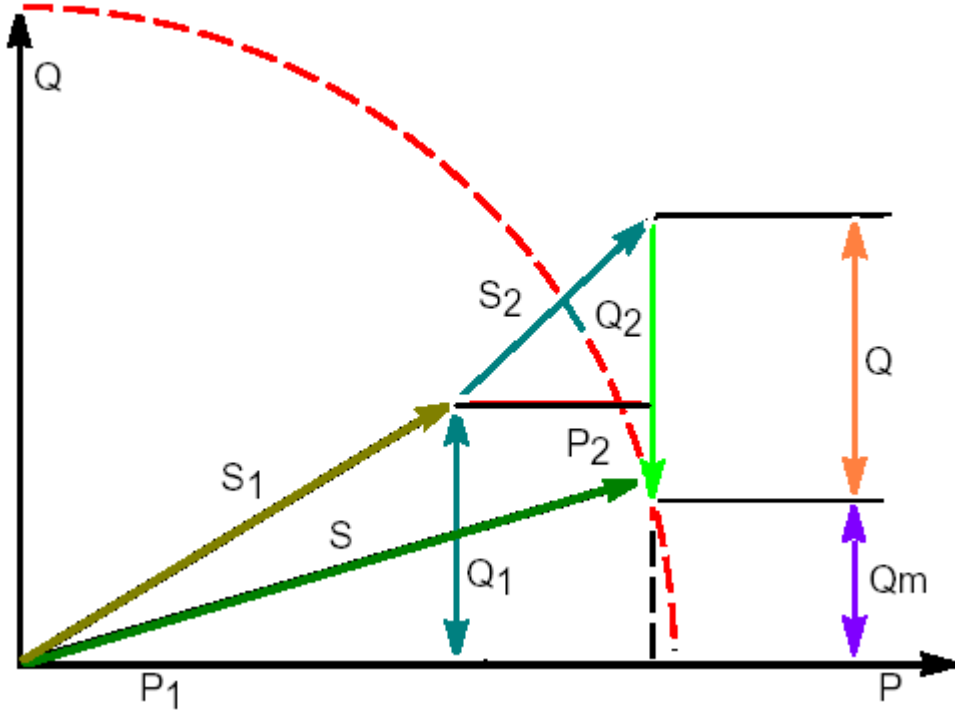
KC faktörünü veren tablodan güç faktörünü 0,7 den 0,95 e çıkartması için gereken değer 0,691 bulunur.

Kompanzasyon için gerekli kondansatör gücü $0,691 \times 85,4 = 59 \text{ kVAR}$ bulunur.

Görününen gücün değeri ise $85,4 / 0,95 = 90 \text{ kVA}$ dır.

Görüüleceği üzere kompanzasyon yapılmaz ise seçilecek transformator gücü 160 kVA kompanzasyon yapıldıktan sonra seçilecek transformator gücü ise 100 kVA olacaktır.

3. Sistemde Çekilebilecek Aktif Gücü Arttırma Esasına Dayanan Metod



Örnek :

630 kVA gücünde transformatör $P_1=450$ kW 0,8 geri güç faktörlü yükü beslemektedir.

Transformatordan çekilen görünen güç $S_1 = \frac{450}{0,8} = 562kVA$

Çekilen reaktif güç

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = 307kVAR \quad (5)$$

Transformatora gelecek tahmini yük artışı 0,7 geri güç faktöründe $P_2=100$ kW dır.

Bu yüke ait görünen güç $S_2 = \frac{100}{0,7} = 143kVA$

İlave yüke ait reaktif güç $Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = 102kVAR$

Beslenecek toplam aktif güç $P = P_1 + P_2 = 550kW$

550kW güç verdiğinde transformatordan reaktif güç kapasitesi

$$Q_m = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{630^2 - 550^2} = 337kVAR$$

Kompanzasyondan önceki toplam reaktif güç ihtiyacı

$$Q_1+Q_2=337+102=439\text{kVAR}$$

Kompanzasyon için kondansatör grubunun gücü

$$Q_C=439 -307=132 \text{ kVAR}$$

tan φ	cos φ	Transformatorun kVA olarak nominal gücü											
		100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
0.00	1	100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
0.20	0.98	98	157	245	309	392	490	617	784	980	1225	1568	1960
0.29	0.96	96	154	240	302	384	480	605	768	960	1200	1536	1920
0.36	0.94	94	150	235	296	376	470	592	752	940	1175	1504	1880
0.43	0.92	92	147	230	290	368	460	580	736	920	1150	1472	1840
0.48	0.90	90	144	225	284	360	450	567	720	900	1125	1440	1800
0.54	0.88	88	141	220	277	352	440	554	704	880	1100	1408	1760
0.59	0.86	86	138	215	271	344	430	541	688	860	1075	1376	1720
0.65	0.84	84	134	210	265	336	420	529	672	840	1050	1344	1680
0.70	0.82	82	131	205	258	328	410	517	656	820	1025	1312	1640
0.75	0.80	80	128	200	252	320	400	504	640	800	1000	1280	1600
0.80	0.78	78	125	195	246	312	390	491	624	780	975	1248	1560
0.86	0.76	76	122	190	239	304	380	479	608	760	950	1216	1520
0.91	0.74	74	118	185	233	296	370	466	592	740	925	1184	1480
0.96	0.72	72	115	180	227	288	360	454	576	720	900	1152	1440
1.02	0.70	70	112	175	220	280	350	441	560	700	875	1120	1400

Tam yüklü transformatörlerde değişik güç faktörleri ile yüklenmede aktif güç kapasitesi

Güç faktörü düzeltmede kondansatör grupları kullanmanın avantajları

- Senkron kompanzatorlarla ve statik kompanzatorlarla karşılaştırıldığında çok düşük maliyette olması
- Tesis ve bakımının kolaylığı
- İşletmede düşük kayıplar(alçak gerilim sistemlerinde 0,5 W/kVAR)
- Geniş güç aralıklarında ve farklı yük profillerinde elemanları paralel devreye girip çıkabilmeleri sayesinde basit olarak ayarının yapılabilmesi

Dezavantajları ise aşırı gerilimlere ve lineer olmayan yüklerle karşı hassas olmasıdır.

Kondansatörlerin üzerinde bulunan imalatçı plakaları üzerinde

- Nominal gerilim U_r
- Nominal frekans f_r
- Nominal güç Q_C kVAR belirtilir

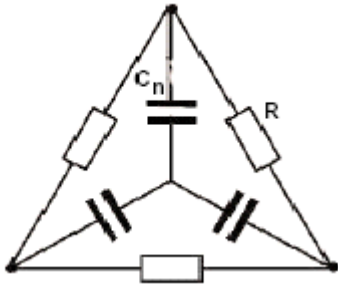
Plakalar üzerinde yazılan verilerden aşağıda verilen ifadeleri kullanarak kondansatörlerin veya kondansatör gruplarının karakteristiklerini bulabiliriz.

	Tek fazlı bağlantı	3-fazlı yıldız bağlantı	3-fazlı üçken bağlantı
Kondansatör grubunun kapasitesi	$C = \frac{Q_r}{2\pi f_r \cdot U_r^2}$	$C = \frac{Q_r}{2\pi f_r \cdot U_r^2}$	$C = \frac{Q_r}{2\pi f_r \cdot U_r^2 \cdot 3}$
Elemanların nominal akımları	$I_r = 2\pi f_r \cdot C \cdot U_r$	$I_r = 2\pi f_r \cdot C \cdot U_r / \sqrt{3}$	$I_r = 2\pi f_r \cdot C \cdot U_r$
Hat akımı	$I_l = I_r$	$I_l = I_r$	$I_l = I_r \cdot \sqrt{3}$

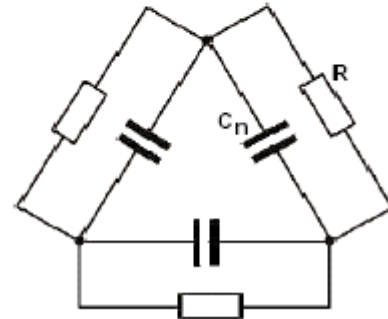
Deşarj Dirençlerinin Değerleri

$$R \leq \frac{60 \text{ s}}{1/3 \cdot C \cdot I_r \left(\frac{U_r \cdot \sqrt{21}}{50 \text{ V}} \right)} \quad (6)$$

$$R \leq \frac{60 \text{ s}}{C \cdot I_r \left(\frac{U_r \cdot \sqrt{21}}{50 \text{ V}} \right)} \quad (7)$$



3-fazlı yıldız bağlı tertip



3-fazlı üçken bağlı tertip

Örnek

$$C = 165.8 \mu\text{F}$$

$$R \leq \frac{60 \text{ s}}{165.8 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot I_n \left(\frac{400 \text{ V} \cdot \sqrt{21}}{50 \text{ V}} \right)}$$

$$R \leq 149.1 \text{ K}\Omega$$

Güç Faktörünün düzeltilmesinin Faydaları

Elektrik maliyetinin azaltılması: Bir tesiste güç faktörünün düzeltilmesiyle elektrik temini yapan idare arasında yapılan sözleşmeye uygun seviyede reaktif güç kullanımı sağlayarak tüketici faturasındaki miktarda önemli ölçüde azalma olur. Tarifelerde reaktif enerji $\tan \varphi$ ye göre fatura edilir.

Teknik ve Ekonomik Optimizasyon:Yüksek güç faktörü tesiste bulunan cihaz ve elemanlarda optimizasyonu sağlar.

- **Kablo boyutlarının azalması:** Aşağıdaki tabloda güç faktörünün azalmasıyla kablo boyutunun artışı görülmektedir.

Tablo 3.

Kablo damarlarının Kesiti için çoğaltma faktörü	1	1.25	1.67	2.5
$\cos \varphi$	1	0.8	0.6	0.4

Kablolarda (P ,kW) kayıplarının azalması.

Kablolardaki kayıplar akımın karesiyle doğru orantılıdır ve tesiste kWh metre ile ölçülür. Toplam akımdaki azalma mesela %10 ise kayıplardaki azalma %20 olur.

$$\cos \varphi_1 \text{ de aktif güç sabit kabul edildiğinde kayıp } P_1 = \frac{R.P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi_1} \quad (8)$$

$$\cos \varphi_2 \text{ de aktif güç sabit kabul edildiğinde kayıp } P_2 = \frac{R.P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi_2} \quad (9)$$

Güç katsayısının düzeltilmesi ile kayıpların azalması

$$\% \Delta P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100 = 100 \cdot \left(\frac{\cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1} - 1 \right) \quad (10)$$

Gerilim düşümünün azalması: Güç katsayısının düzeltilmesi ile geliş tarafındaki kablo veya hatların gerilim düşümü azalır.

p_z yüzde olarak kayıp güç olmak üzere P aktif gücün sabit olarak çekilme durumunda yüzde gerilim düşümü

$$\% \Delta u = 100 \cdot \left(p_z \cdot \cos^2 \varphi + \frac{P \cdot X}{U_N^2} \tan \varphi \right) \quad (11)$$

$$\% \Delta u = \frac{u_x}{100} \cdot \frac{Q_c}{S_T} \quad (12) \text{ Aşırı kompanzasyonda gerilim artışı}$$

Transformatorde gerilim yükselmesi

Qc kondansatör gücü(kvar)

S_T transformator gücü (kVA)

Şebekeden elde edilebilecek gücün artması:

Güç faktörünü düzelterek transformator üzerinden geçen akımı azaltarak transformatorun ilave yüklenmesini sağlar.Burada iki durum göz önüne alınır.

1. Durum

Hat sonundan çekilen aktif gücü sabit kabul edersek kompanzasyondan evvel çekilen görünür güç

$$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1} \quad (13) \text{ ve kompanzasyondan sonra çekilen görünür güç}$$

$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2}$ (14) olmak üzere aradaki fark $\Delta S = S_1 - S_2$ veya yüzde olarak ifade edersek

$$\% \Delta S = \frac{\Delta S}{S} \cdot 100 = 100 \cdot \left(1 - \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \right) \quad (15) \text{ elde edilir.}$$

2.Durum

Hat sonundan çekilen görünen gücü sabit kabul edip kompanzasyondan önceki aktif güç

$$P_1 = S \cdot \cos \varphi_1 \text{ ve kompanzasyondan sonra çekilen aktif güç}$$

$P_2 = S \cdot \cos \varphi_2$ olmak üzere aradaki fark $\Delta P = P_2 - P_1$ veya yüzde olarak ifade edersek

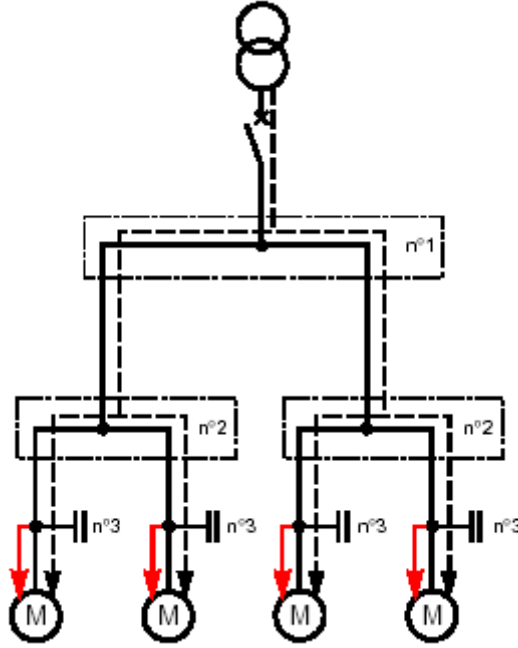
$$\% \Delta P = \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100 = 100 \left(\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right) \quad (16) \text{ elde edilir.}$$

Güç faktörü düzeltme metodları

Reaktif güç kondansatör bataryaları tesis edilmek suretiyle reaktif enerji kaynağı meydana getirmek suretiyle sağlanır. Bu düzenlemeye reaktif güç kompanzasyonu denir. Bir endüktif yük generatör, taşıma hattı veya transformatör üzerinden geçmek suretiyle ilave güç kayıpları ve aşırı gerilim düşümleri meydana getirir. Eğer kondansatör grupları sisteme paralel olarak bağlanırsa aynı güç kaynağı üzerinden ters yönde geçerek endüktif reaktif yükü ifna eder. Kaondansatör bataryaları çok büyük olup $I_C = I_L$ olacak şekilde bir kapasitif akım akacak olursa kondansatörlerin enerji temin tarafında hiçbir reaktif akım akmaz. Bu durumda güç faktörü 1 değerindedir. Genelde güç faktörünün tamamen kompanze edilmesi ekonomik değildir.

Bireysel güç faktörü düzeltilmesi

Bu metotta reaktif güç çeken cihazın kompanzasyonu için gereken kapasitede kondansatör grubu cihazın bağlantı terminallerine bağlanır.



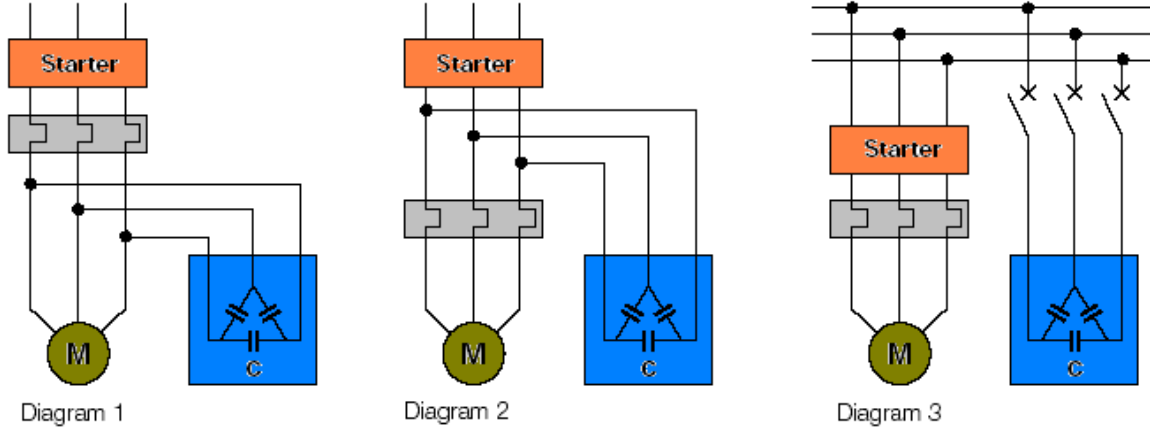
Şekil 1 Bireysel Kompanzasyon

Tesis basit ve ekonomiktir. Kondansatör ve bağlı olduğu cihaz aynı aşırı yük ve kısa devre koruma elemanı ile korunurlar ve aynı anda devreye girip çıkarlar.

Avantajları

- Aşırı reaktif güç tüketimine dayalı cezalı ödeme azalır
- Görünen güç (kVA) talebi azalır.
- Kablo kayıplarının azalmasının yanı sıra kablo kesitlerindedeki azalma olur
- Tesiste kayda değer reaktif akım akışı bulunmaz

Bu tip güç faktörü düzeltme metodu kesintisiz uzun süreli çalışan büyük güçte tüketiciler için tavsiye olunur ve genellikle büyük güçlü motorlarda ve floresan armatürlerde kullanılır.



Şekil 2: Elektrik motorlarında bireysel kompanzasyon

Diagram 1 ve 2 görülen bağlantı halinde motor beslemeden ayrıldığı zaman ,motor artık kinetik enerjiden dolayı dönmeye devam edecek , terminallerine bağlı olan kondansatör grubu vasıtasıyla uyarılarak asenkron generator gibi çalışacağından açma ve kontrol cihazının yük tarafında gerilim devam edecek nominal akımın iki katına kadar aşırı gerilim altında kalma riski ortaya çıkacaktır.

Bu riski ortadan kaldırmak için diagram 3 de görülen bağlantı kullanılır. Diagram 3 de verilen sistemde motor çalıştığı sürece kondansatör grubu motor terminallerine bağlı kalır. Motor devreden çıkmadan önce kondansatör grubu devreden çıkartılır.

Genel kural olarak motorların güç faktörünü düzeltmek kullanılacak kondansatör grubunun gücü motorun boşa çalışma gücü Q_0 nün 0,9katı olarak belirlenir.

Gerilim Volt olarak alınırsa motor için gerekli kondansatör grubu gücü

$$Q_c = 0,9 Q_r = 0,9 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_r \cdot I_0}{1000} \text{ kVAR} \quad (17)$$

I_0 Motorun boşa çalışma akımı İmalatçı tarafından genellikle dökümantasyonlarda verilir.

Tablo 1:Elektrik motorlarında güç faktörünü düzeltilmesi için gerekli kondansatör grubu gücü

P_r [kW]	Q_c [kvar]	Güç Faktörü Düzeltilmeden önce $\cos\phi_r$	I_r [A]	Güç Faktörü Düzeltildikten sonra $\cos\phi_s$	I_s [A]
400V / 50 Hz / 2 poles / 3000 r/min					
7.5	2.5	0.89	13.9	0.98	12.7
11	2.5	0.88	20	0.95	18.6
15	5	0.9	26.5	0.98	24.2
18.5	5	0.91	32	0.98	29.7
22	5	0.89	38.5	0.96	35.8
30	10	0.88	53	0.97	47.9
37	10	0.89	64	0.97	58.8
45	12.5	0.88	79	0.96	72.2
55	15	0.89	95	0.97	87.3
75	15	0.88	131	0.94	122.2
90	15	0.9	152	0.95	143.9
110	20	0.86	194	0.92	181.0
132	30	0.88	228	0.95	210.9
160	30	0.89	269	0.95	252.2
200	30	0.9	334	0.95	317.5
250	40	0.92	410	0.96	391.0
315	50	0.92	510	0.96	486.3
400V / 50 Hz / 4 poles / 1500 r/min					
7.5	2.5	0.86	14.2	0.96	12.7
11	5	0.81	21.5	0.96	18.2
15	5	0.84	28.5	0.95	25.3
18.5	7.5	0.84	35	0.96	30.5
22	10	0.83	41	0.97	35.1
30	15	0.83	56	0.98	47.5
37	15	0.84	68	0.97	59.1
45	20	0.83	83	0.97	71.1
55	20	0.86	98	0.97	86.9
75	20	0.86	135	0.95	122.8
90	20	0.87	158	0.94	145.9
110	30	0.87	192	0.96	174.8
132	40	0.87	232	0.96	209.6
160	40	0.86	282	0.94	257.4
200	50	0.86	351	0.94	320.2
250	50	0.87	430	0.94	399.4
315	60	0.87	545	0.93	507.9

P _r [kW]	Q _c [kvar]	Güç faktörü düzeltirmeden önce		Güç faktörü düzeltildikten sonra	
		cosφ _r	I _r [A]	cosφ ₂	I ₂ [A]
400V / 50 Hz / 6 poles / 1000 r/min					
7.5	5	0.79	15.4	0.98	12.4
11	5	0.78	23	0.93	19.3
15	7.5	0.78	31	0.94	25.7
18.5	7.5	0.81	36	0.94	30.9
22	10	0.81	43	0.96	36.5
30	10	0.83	56	0.94	49.4
37	12.5	0.83	69	0.94	60.8
45	15	0.84	82	0.95	72.6
55	20	0.84	101	0.96	88.7
75	25	0.82	141	0.93	123.9
90	30	0.84	163	0.95	144.2
110	35	0.83	202	0.94	178.8
132	45	0.83	240	0.95	210.8
160	50	0.85	280	0.95	249.6
200	60	0.85	355	0.95	318.0
250	70	0.84	450	0.94	404.2
315	75	0.84	565	0.92	514.4

400V / 50 Hz / 8 poles / 750 r/min					
7.5	5	0.7	18.1	0.91	13.9
11	7.5	0.76	23.5	0.97	18.4
15	7.5	0.82	29	0.97	24.5
18.5	7.5	0.79	37	0.93	31.5
22	10	0.77	45	0.92	37.5
30	12.5	0.79	59	0.93	50.0
37	15	0.78	74	0.92	62.8
45	20	0.78	90	0.93	75.4
55	20	0.81	104	0.93	90.2
75	30	0.82	140	0.95	120.6
90	30	0.82	167	0.93	146.6
110	35	0.83	202	0.94	178.8
132	50	0.8	250	0.93	214.6

Transformatorların kompanzasyonu

Özellikle birkaç transformatorun yer aldığı tesislerde güç faktörünün düzeltilmesinin doğrudan transformator üzerinden yapılması tavsiye olunur. Zira çoğunlukla elektrik idareleri tarafından sayaçlar transformatorun primer orta gerilim çak gerilim tarafında tarafına yerleştirilmesi istenir. Bu halde güç faktörü alçak gerilim tarafında mesela 0,93 olduğu halde ölçü tarafında bu değer transformatorun çektiği reaktif güç kompanze edilmediği için 0,85 olabilir. Cezalı fatura ödenmemesi için ya transformatorun yük durumuna göre devreye otomatik devreye girip çıkan otomatik kompanzasyon grupları ile veya yüklenme fazla değişmeyen sistemlerde sabit ve elle devreye sokulabilen gruplar kullanılarak transformatorun kompanzasyonu sağlanmalıdır.

l_0 transformatorun % olarak boşa çalışma akımı

u_k transformatorun % olarak nisbi kısa devre gerilimi

P_{fe} transformatorun kW olarak demir kayıpları

P_{CU} transformatorun kW olarak bakır kayıpları

K_L yüklenme faktörü

olmak üzere transformatorun bireysel kompanzasyonu için gerekli kapasitif güç ihtiyacı

$$Q_C = \sqrt{\left[\frac{l_0}{100} S_r\right]^2 - P_{fe}^2} + K_L^2 \sqrt{\left[\frac{u_k}{100} S_r\right]^2} \approx \left[\frac{l_0}{100} S_r\right] + K_L^2 \left[\frac{u_k}{100} S_r\right] \quad (18)$$

ifadesinden hesap edilir.

Örnek :

Nominal gücünün %60 ina kadar yüklenebilen bir transformatörün kompanzasyonu için gerekli köndansatör grubu gücü hesaplanacaktır.

Transformatorun plakasında yazılan değerler.

$$l_0 = \%1,8$$

$$u_k = \%4$$

$$P_{CU} = 8,8\text{kW}$$

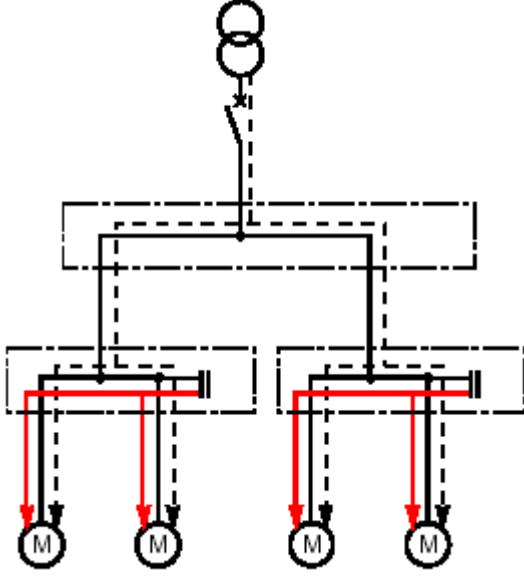
$$P_{fe} = 1,2\text{kW}$$

$$Q_C = \sqrt{\left[\frac{1,8}{100} \cdot 630\right]^2 - 1,2^2} + 0,6^2 \sqrt{\left[\frac{4}{100} \cdot 630\right]^2} - 8,9 = 19,8\text{kVAR}$$

Tablo 2: Transformatorların kompanzasyonu için gerekli kondansatör güçleri

S _r [kVA]	u _k % [%]	i ₀ % [%]	P ₀ [kW]	Q _c [kvar] P _{cu} [kW]	yüklenme faktörü K _L				
					0	0.25	0.5	0.75	1
Yağlı transformatorlar YG-AG									
50	4	2.9	0.25	1.35	1.4	1.5	1.8	2.3	2.9
100	4	2.5	0.35	2.30	2.5	2.7	3.3	4.3	5.7
160	4	2.3	0.48	3.20	3.6	4	5	6.8	9.2
200	4	2.2	0.55	3.80	4.4	4.8	6.1	8.3	11
250	4	2.1	0.61	4.50	5.2	5.8	7.4	10	14
315	4	2	0.72	5.40	6.3	7	9.1	13	18
400	4	1.9	0.85	6.50	7.6	8.5	11	16	22
500	4	1.9	1.00	7.40	9.4	11	14	20	28
630	4	1.8	1.20	8.90	11	13	17	25	35
800	6	1.7	1.45	10.60	14	16	25	40	60
1000	6	1.6	1.75	13.00	16	20	31	49	74
1250	6	1.6	2.10	16.00	20	24	38	61	93
1600	6	1.5	2.80	18.00	24	30	47	77	118
2000	6	1.2	3.20	21.50	24	31	53	90	142
2500	6	1.1	3.70	24.00	27	37	64	111	175
3150	7	1.1	4.00	33.00	34	48	89	157	252
4000	7	1.4	4.80	38.00	56	73	125	212	333
Dökme reçineli transformatorlar YG-AG									
100	6	2.3	0.50	1.70	2.2	2.6	3.7	5.5	8
160	6	2	0.65	2.40	3.1	3.7	5.5	8.4	12
200	6	1.9	0.85	2.90	3.7	4.4	6.6	10	15
250	6	1.8	0.95	3.30	4.4	5.3	8.1	13	19
315	6	1.7	1.05	4.20	5.3	6.4	9.9	16	24
400	6	1.5	1.20	4.80	5.9	7.3	12	19	29
500	6	1.4	1.45	5.80	6.8	8.7	14	23	36
630	6	1.3	1.60	7.00	8	10	17	29	45
800	6	1.1	1.94	8.20	8.6	12	20	35	56
1000	6	1	2.25	9.80	9.7	13	25	43	69
1250	6	0.9	3.30	13.00	11	15	29	52	85
1600	6	0.9	4.00	14.50	14	20	38	67	109
2000	6	0.8	4.60	15.50	15	23	45	82	134
2500	6	0.7	5.20	17.50	17	26	54	101	166
3150	8	0.6	6.00	19.00	18	34	81	159	269

Grup Kompanzasyonu



Şekil 3: Grup kompanzasyonu

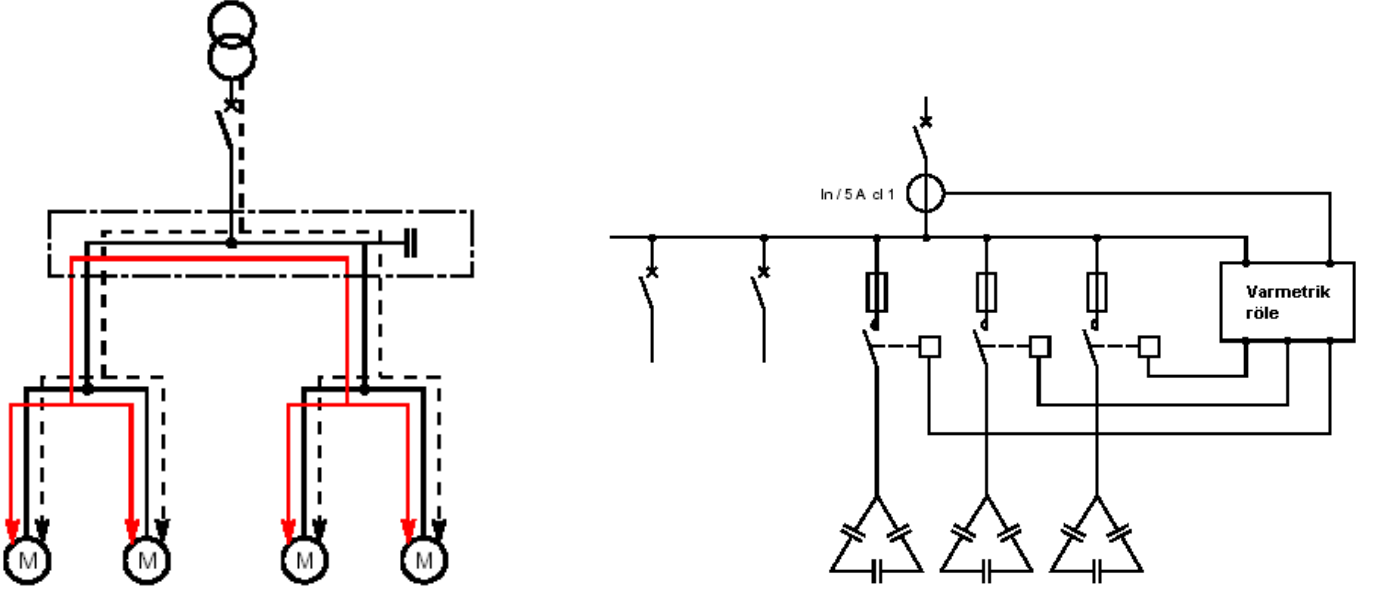
Avantajları

- Aşırı reaktif güç tüketimine dayalı cezalı ödeme azalır
- Görünen güç talebi azalır.
- Transformator rahatlar ,gerektiğinde daha fazla aktif yükü üzerine alabilir.
- Dağıtım panolarını besleyen kabloların kesitleri azalabilir veya kesit aynı kalma kaydıyla daha fazla yüklenebilir.
- Bazı kablolarda(dağıtım panolarını besleyen)kayıplar azalır.

Dezavantajları

- Dağıtım panosundan çıkan yüklere ait kablolar üzerinden reaktif akım akmaya devam eder.
- Söz konusu nedenden dolayı grub kompanzasyonunda çıkış kablolarının kesitinde ve bu kablolarda meydana gelen kayıplarda azalma olmaz.
- Geniş aralıklı yük değişimlerinin olduğu yerlerde daima aşırı kompanzasyon ve buna bağlı olarak aşırı gerilim riski vardır.

Merkezi kompanzasyon



Şekil 4: Merkezi kompanzasyonu

Kondansatör grupları alçak gerilim ana dağıtım panosunun baralarına bağlıdır ve varmetrik röle ve kontaktörler vasıtasıyla gerekli kapasitif reaktif güç ihtiyacına göre devreye girer ve çıkarlar.

Avantajları

- Aşırı reaktif güç tüketimine dayalı cezalı ödeme azalır
- Görünen güç talebi azalır
- Transformator rahatlar ,gerektiğinde daha fazla aktif yükü üzerine alabilir.

Dezavantajları

- Reaktif akım tüm kabloların ve iletkenlerin üzerinden akmaya devam eder.
- Bu sebepten dolayı iletkenlerin kesitlerinde bir azaltmaya gidilemez ve güç kayıplarında azalma olmaz.

Kompanzasyon gruplarının devreye girip çıkması ve korunması için kullanılan kesiciler ve bağlantı iletkenleri.

Alçak gerilim sistemlerinde kompanzasyon gruplarını devreye sokup çıkaracak ve bu grupları koruyacak olan kesiciler aşağıda belirtilen özelliklere sahip olacaktır.

- Kompanzasyon grupları devreye girip çıkarırken meydana gelen geçici akımlara karşı dayanıklı olacaktır.
- Gerilim harmoniklerinden dolayı ortaya çıkan periyodik veya kalıcı aşırı akımlara karşı nominal kapasitesinin +%15 toleransında dayanıklı olmalıdır.
- Yüklü ve yüksüz işletmelerde yüksek sayıda ve sıklıkta anahtarlama kapasitesine sahip olmalıdır
- Dış cihazlarla(kontaktörler)koordine edilebilmelidir.

Ayrıca kesicinin kısa devre açma ve kapama kapasitesi tesiste bağlandığı yerde meydana gelebilecek kısa devre akımlarının değerinden yüksek olmalıdır.

IEC 60831-1 ve 60931-1 e göre I_r kompanzasyon grubunun nominal akımı olmak üzere Söz konusu grubun taşıması şart koşulan maksimum akım

$$I_{C_{max}} = 1,3, 1,15 \cdot \frac{Q_r}{\sqrt{3} \cdot U_r} \approx 1,5 \cdot I_r \quad (19) \quad \text{olmalıdır.}$$

Bundan dolayı kesicinin nominal akımı $1,5 \cdot I_r$ den daha büyük olacak ve aşırı akım koruma ayarı $1,5 \cdot I_r$ değerine getirilecektir. Aynı şekilde Kompanzasyon gruplarının baraya bağlantı iletkenlerinin seçiminde $1,5 \cdot I_r$ değeri esas alınacaktır

Kompanzasyon gruplarının devreye girmesi ,kısa devre şartları altında kapama işleminin benzeridir. Devrenin kapanması esnasında meydana gelen akımlar 1-1,5 kHz frekansına, 1-3 msn süreye, 25-200 I_r akım tepe değerine sahip olduğundan; kesicilerin uygun bir kapama kapasitesine ve ani kısa devre açtırma ayarının gereksiz açmaları yapmayacak değere getirilmesi gerekir.

Eğer kondansatör grupları transformatorun alçak gerilim tarafına bağlanacaksa şebekede yüksek harmonik miktarları göz önüne alınarak şebekede gerilim rezonansının meydana gelip gelmeyeceği kontrol edilmelidir.Belirlenen bir harmonikte gerilim rezonansı meydana getirebilecek kapasitörün gücü

$$Q_C < \frac{S_{rT} \cdot 100}{V^2 \cdot u_k} \quad (20) \quad \text{ifadesi ile bulunur}$$

Bu ifadede

Q_C kompanzatör grubunun gücü kVAR

S_{rT} transformatorun nominal gücü Kva

u_k transformatorun nisbi kısa devre gerilimi %

v harmonik sayısı

U_m Maksimum sistem işletme gerilimi

Sistemdeki gerilim ve frekansın artışı ayrıca gerilim veya akımdaki harmonik miktarlarının artışıkondansatörleri ilave olarak yükler. Bu ilave yüklenme ile kompanzasyon grubunun yüklenmesi nominal kapasitesinin 1,35 katını aşmamalıdır. Bu şartlar altında yüklenme

$$\frac{Q}{Q_c} = \frac{f_1}{f_c} \cdot \left(\frac{U_m}{U_c}\right)^2 \left[1 + \Sigma(\nu - 1) \left(\frac{U_\nu}{U_m}\right)^2 \right] \leq 1,35$$

(21) ifadesi ile bulunur.

Eğer bu ifade ile belirlenen sınır şartlar aşılsa seçilen kompanzasyon grubu kaldırılarak yerine daha yüksek gerilim değerine haiz aşağıda verilen eşitlikle gücü belirlenen yeni kompanzasyon grubu tesisi edilir.

$$Q_{c2} = Q_{c1} \cdot \left(\frac{U_{c2}}{U_{c1}}\right)^2 \quad (21)$$

Q_c, f_c, U_c kondansatörün plakasında yazan değerlerdir.

U_m sistemin maksimum işletme gerilimidir.

U_ν sistem geriliminin belirlenen harmonik için kısmi değeridir.

Yüklenmede gerilim $1,1 U_c$ değerini aşmayacaktır

$$\frac{U_m}{U_c} \cdot \frac{\sqrt{\Sigma U_\nu^2}}{U_c} \leq 1,1 \quad \text{şartı gerçekenmelidir} \quad (22)$$

Örnek:

3-faz 4-hatlı 220/380 V luk sistemde , $U_m=407$ V , $U_1=405$ V, $U_5=35$ V, $U_7=25$ V, $U_{11}=1,5$ V di. Sistemde 3. harmonik görülmemektedir. Kondansatörler üçken bağlı olup nominal gerilimleri $U_r=380$ V dur.

$$\frac{U_m}{U_r} = \frac{407}{380} = 1,07 < 1,1$$

$$I = \frac{50\text{Hz}}{50\text{Hz}} \cdot \frac{407\text{V}}{380\text{V}} \cdot \sqrt{1 + 24\left(\frac{35\text{V}}{407\text{V}}\right)^2 + 48\left(\frac{25\text{V}}{407\text{V}}\right)^2 + 120\left(\frac{1,5\text{V}}{407\text{V}}\right)^2} = 1,25 I_c$$

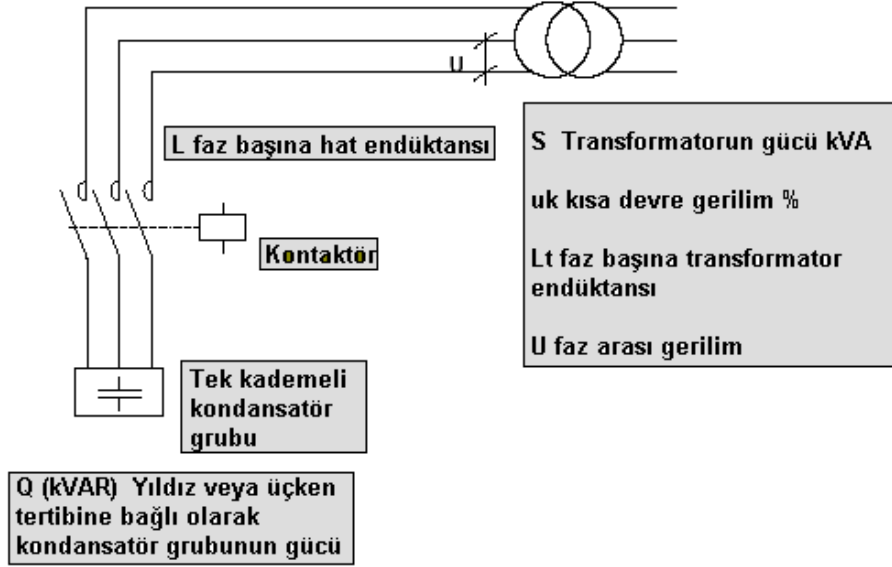
$$Q = \frac{50\text{Hz}}{50\text{Hz}} \cdot \left(\frac{407\text{V}}{380\text{V}}\right)^2 \left[1 + 4\left(\frac{35\text{V}}{407\text{V}}\right)^2 + 48\left(\frac{25\text{V}}{407\text{V}}\right)^2 + 120\left(\frac{1,5\text{V}}{407\text{V}}\right)^2 \right] = 1,2 Q_c$$

Açma kapama ,koruma cihazları ve bağlantı iletkenleri yukarda açıklanan aşırı yüklenme durumları göz önüne alınarak seçilecektir.

Kondansatör Gruplarının Devreye Alınması

Devreye Girme (Inrush) akımının Tepe Değerinin ve Frekansının Hesabı

1 Tek Kademeli Kondansatör Grubunun Devreye Alınması



Şekil 5: Tek kademeli kompanzasyon grubunun devreye alınması

Devreye girme akımı tepe değeri

$$\hat{i} = \sqrt{\frac{10^9}{3\pi f}} \times \sqrt{\frac{Q}{L + L_t}} \quad \hat{i} = k_1 \sqrt{\frac{Q}{L + L_t}} \quad (23)$$

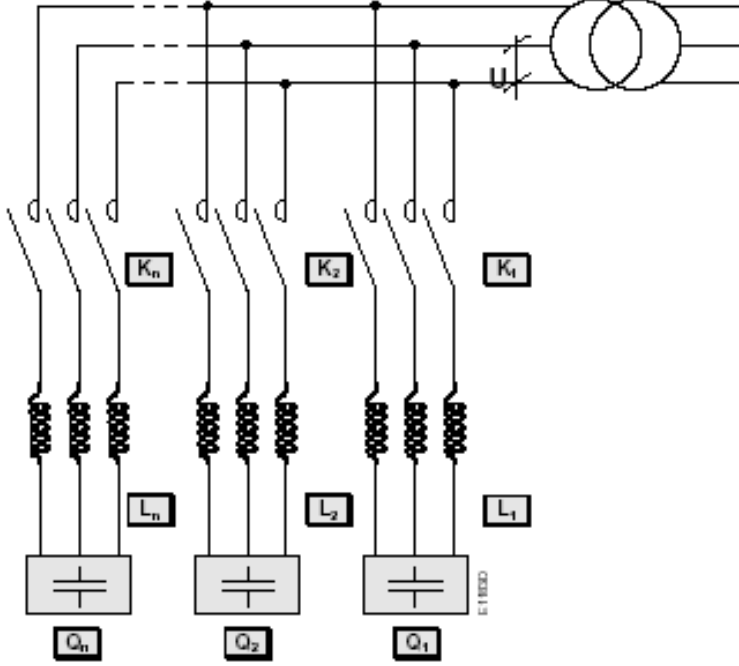
Devreye girme akım frekansı

$$f_0 = k_2 U \sqrt{\frac{1}{Q(L + L_t)}} \quad (24)$$

\hat{i} A
 f Ana akım frekansı Hz
 Q Kondansatör grubu gücü kVAR
 L, L_t μ H

k_1	1457 (50 Hz)	1330 (60 Hz)
k_2	89.2 (50 Hz)	97.2 (60 Hz)

Aynı Güce sahip birden fazla kademeli sistemin devreye girmesi



Şekil 6: Aynı güçte kademeli kompanzasyon gruplarının devreye alınması

Devreye girme akımı tepe değeri

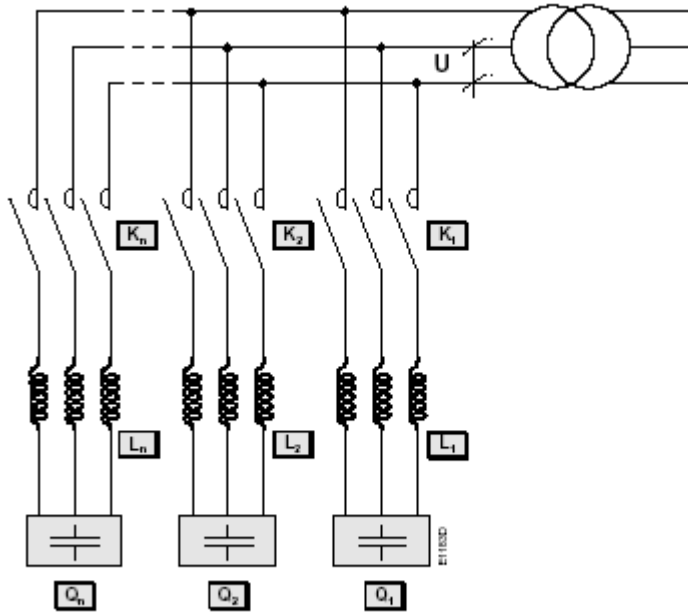
$$\hat{I} = \sqrt{\frac{10^9}{3 \pi f}} \times \sqrt{\frac{Q}{L+1}} \quad \hat{I} = k_1 \frac{n-1}{n} \times \sqrt{\frac{Q_n}{L_n}}$$

Devreye girme akım frekansı (25)

$$f_0 = k_2 U \sqrt{\frac{1}{L_n \times Q_n}} \quad (26)$$

\hat{I} A
 f Ana akım frekansı Hz
 Q Kondansatör grubu gücü kVAR
 $L_1 = L_2 = L_{...} = L_n$: Kompanzasyon kademeleri bağlantı iletkenlerinin endüktansı μH

k_1 1457 (50 Hz)	1330 (60 Hz)
k_2 89.2 (50 Hz)	97.2 (60 Hz)



Şekil 7 Farklı güçte kademeli kompanzasyon gruplarının devreye alınması

Devreye girme akımı \hat{I} :

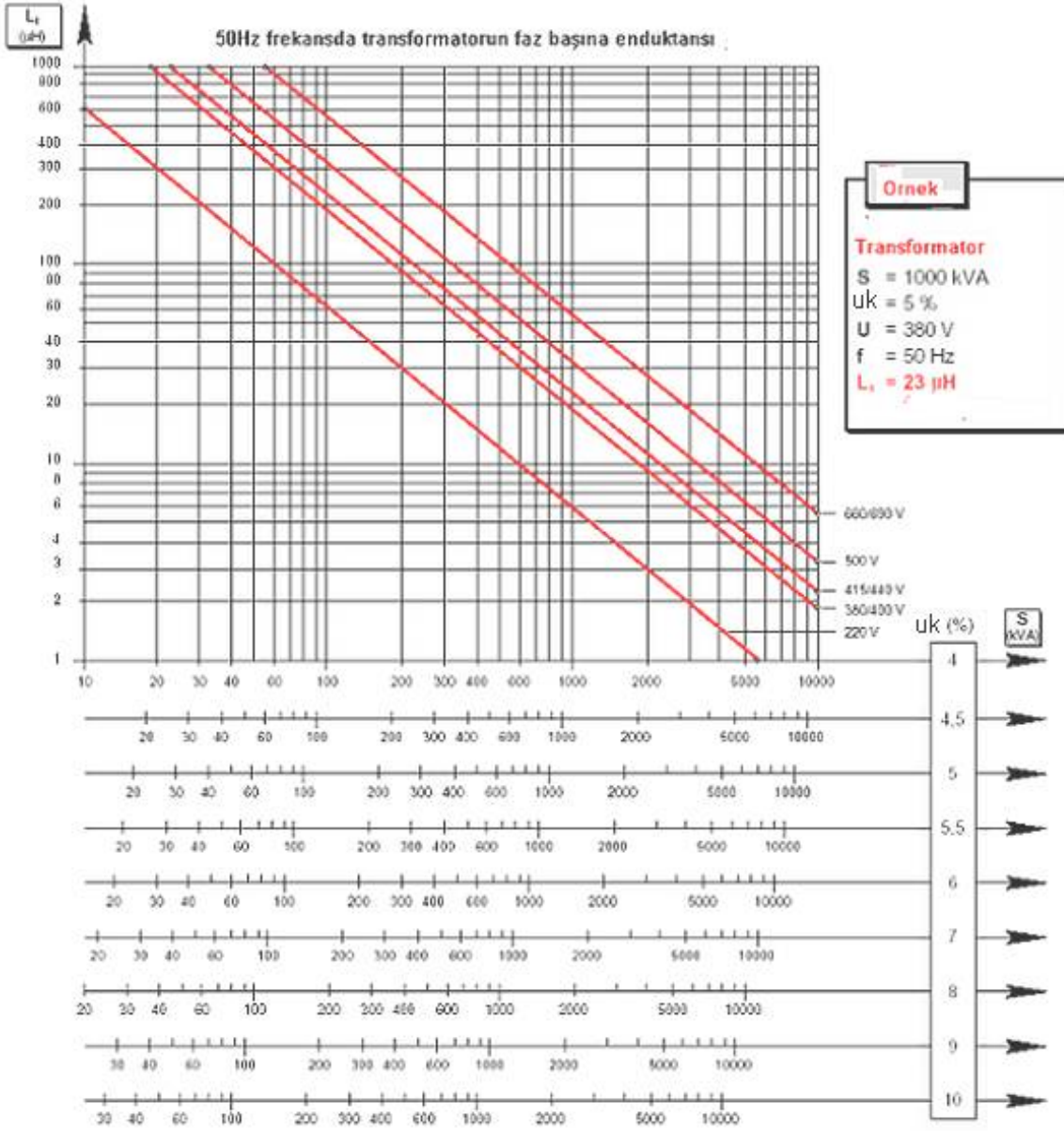
$$\hat{I} = k_1 \sqrt{\frac{(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{n-1}) Q_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n} \times \frac{1}{L_n + \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_{n-1}}}}} \quad (27)$$

En küçük kademelerin gücü (28)

$$L_n = L_1 \frac{Q_1}{Q_n} \quad (29)$$

$$\begin{array}{ll} Q_1 = a Q_n & L_1 = L_n / a \\ Q_2 = b Q_n & L_2 = L_n / b \\ Q_{..} = .. Q_n & L_{..} = L_n / .. \\ \vdots & \vdots \\ Q_{n-1} = z Q_n & L_{n-1} = L_n / z \end{array} \quad (30)$$

Transformatorun Endüktansının belirlenmesi



Şekil 8: Transformatorun endüktansının belirlenmesi için diyagram

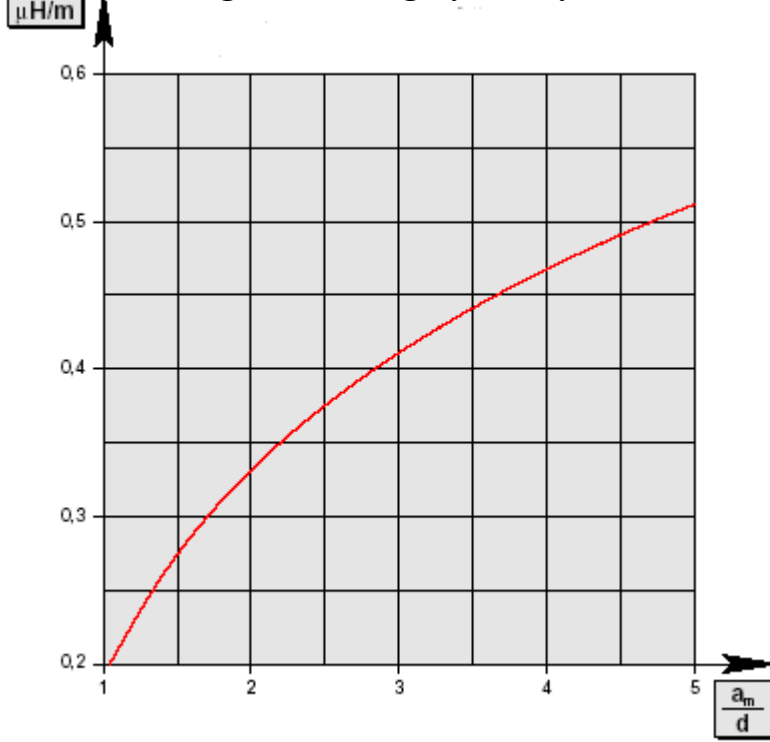
Transformator faz başına endüktansı

$$L_t = \frac{1}{200 \pi f} \cdot \frac{u_k U^2}{S} \cdot 10^3 \quad L_t = \frac{u_k U^2}{k_3 S} \quad (31)$$

$$k_3 = 31.4 (50 \text{ Hz}) \quad 37.68 (60 \text{ Hz})$$

Bağlantı hatlarının Endüktanslarının belirlenmesi

Bağlantıların magnetik olmayan iletkenlerle ve bu iletkenlerin lineer katsayılarının aynı olduğu kabul edilerek aşağıda verilen eğri yardımıyla bulunabilir.

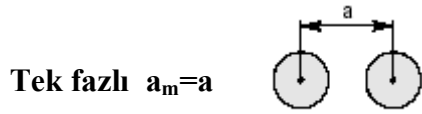


Şekil 9: Bağlantı hatlarının belirlenmesi için diyagram

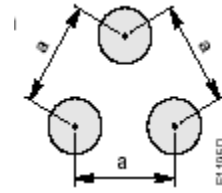
$$L = [0.05 + 0.46 \log_{10} \frac{2 a_m}{d}] \mu\text{H/m} \quad (32)$$

d iletken damarının çapı (mm)

a_m iletkenlerin merkezleri arasındaki uzaklığın geometrik ortalaması (mm)



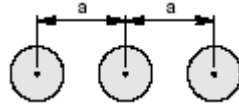
3-fazlı üçgen tesis $a_m = a$



3-fazlı yatay tesis

$$a_m = a \sqrt[3]{2}$$

$$a_m = 1.26 a$$



Bazı iletkenler için değerler

iletken kesiti (mm ²)	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
iletken damar çapı $\varnothing = d$ (mm)	2.26	2.92	3.9	4.9	6.1	7.2	8.4	10.1	11.9	13.4
iletken dış izolasyon çapı \varnothing U1000 RO2V	7.2	8.2	9.2	10.5	12.5	13.5	15	17	19	21

Tablo 3: Kompanzasyon tesisati için kullanılan iletkenlere ait veriler

Devreye girme akımlarının Zayıflaması

Eğer elektrik bağlantı elemanlarının endüktansları çok düşükse kondansatörlerin devreye girme esnasında çektikleri geçici akımların zayıflaması ve sönmesi gerekli sürede olmazsa meydana gelen aşırı ısınmadan dolayı kontaktörlerin ana kontaklarının kaynak olmasına sebep olur.

Böyle bir riskten sakınmak için kullanıcı ya söz konusu yüksek akım değerlerine dayanabilecek yüksek akım değerli kontaktör seçmek veya devrede seri bağlı ilave endüktanslar kullanmak mecburiyetindedir.

Tek kademeli kondansatör grubu

$$\hat{I} = k_1 \sqrt{\frac{Q}{L + L_t}} \quad (33) \quad L_{\min} = \left(\frac{k_1^2}{I^2} Q \right) - L_t \quad (34)$$

Aynı değerlere sahip çok kademeli kondansatör grubu

$$\hat{I} = k_1 \frac{n-1}{n} \sqrt{\frac{Q_n}{L_n + L_t}} \quad (35) \quad L_{\min} = \left(\frac{k_1^2}{I^2} \frac{(n-1)^2}{n^2} Q_n \right) - L_t \quad (36)$$

L_{\min} : Elektriksel bağlantının minimum endüktansı μH

\hat{I} : Kontaktörün dayanabileceği minimum darbe akımı **A**

Q : Kompanzasyon grubunun gücü **kvar**

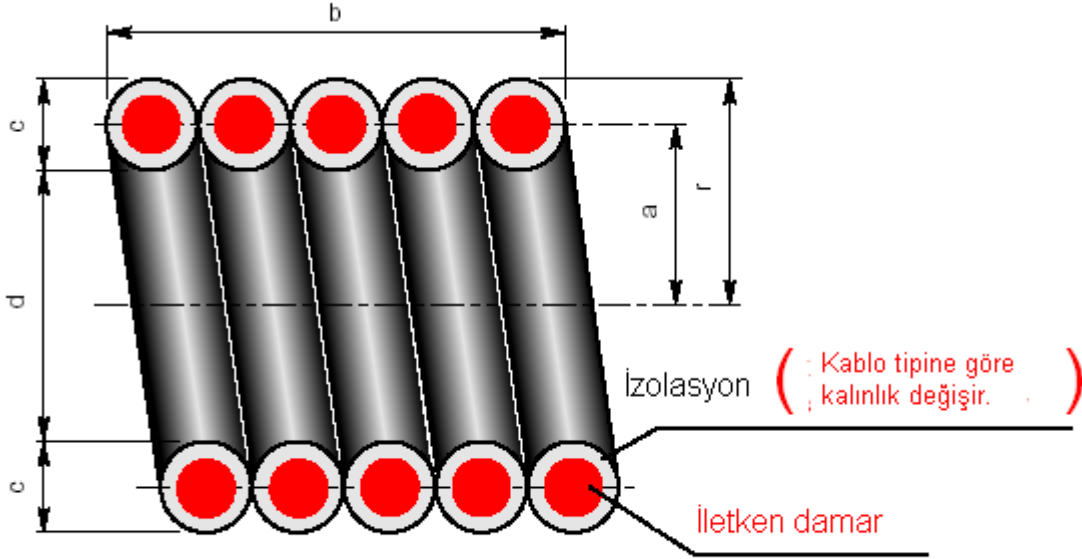
Q_n : n. ci kademedeki güç **kvar**

L_t : Transformatorun faz başına endüktansı μH

$k_1=1457$ (if $f = 50 \text{ Hz}$) : $= 1330$ (if $f = 60 \text{ Hz}$)

İlave Endüktans yapmak için pratik metod

Elektrik bağlantılarının endüktanslarının çok düşük olması halinde bu bağlantı hatlarını d çapında bir silindir etrafında sarılırsa endüktans bobini haline getirilebilir ve bağlantı hatları için ilave endüktans sağlanır.



ŞEKİL 10: İlave bobinin boyutları

$$L = 10^{-7} \frac{4 \pi^2 \cdot a^2 \cdot N^2}{b + c + r} \cdot F_1 \cdot F_2 \quad (37) \quad F_1 = \frac{10b + 12c + 2r}{10b + 10c + 1,4r} \quad (38)$$

L : Self-endüktans H

N : Sarım sayısı

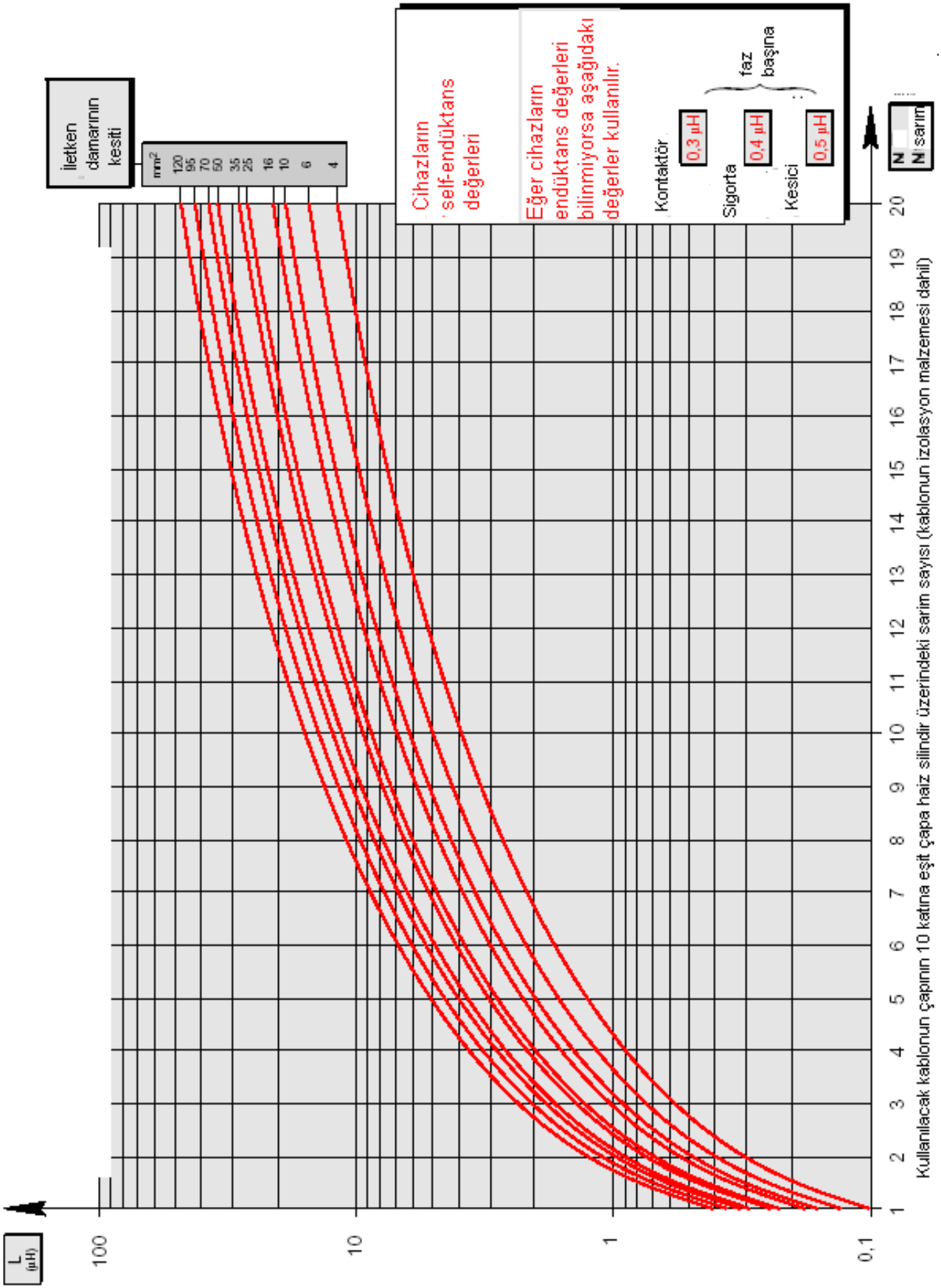
a, b, c, d, r : Boyutlar (m)

$$F_2 = 0.5 \log_{10} \left(100 + \frac{14r}{2b + 3c} \right)$$

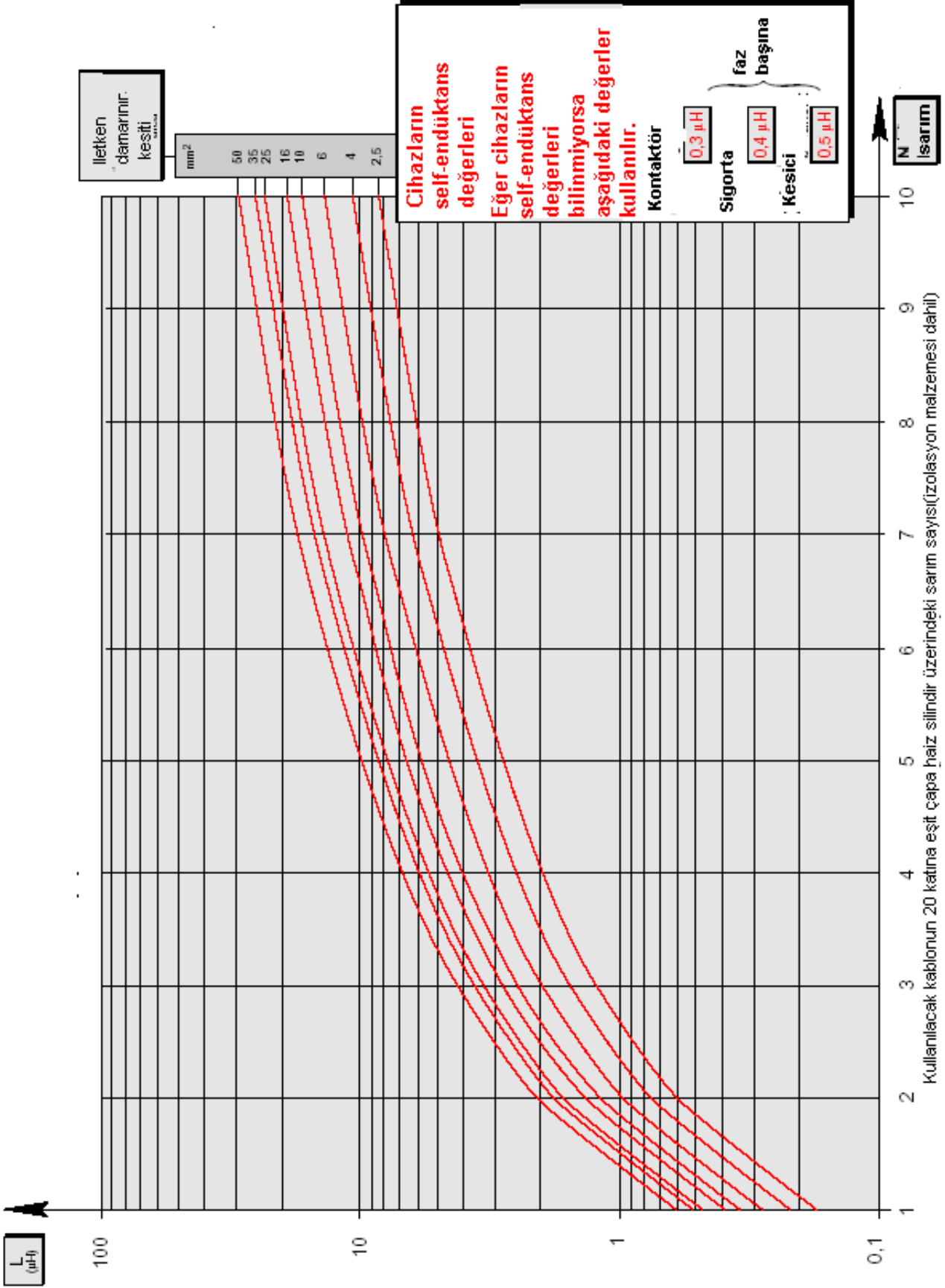
(39)

Aşağıda verilen eğrilerde aşağıda verilen kriterlere göre yapılacak bobininin sarım sayısı belirlenecektir.

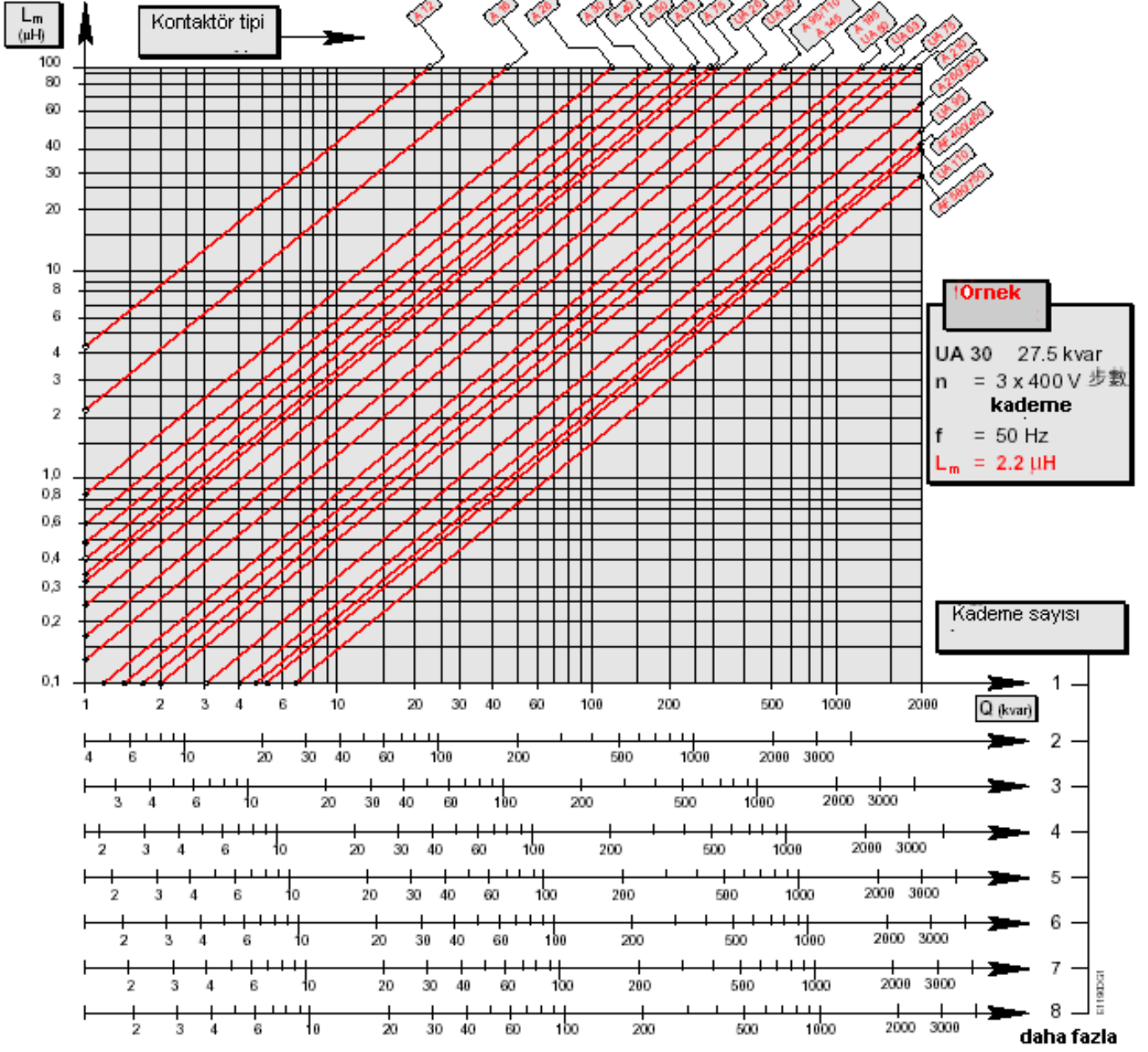
- Kondansatör grubunu bağlamada kullanılacak kablonun kesiti
- Bobinin yapımında kullanılan silindirin çapı
- İhtiyaç duyulan endüktansın değeri



Şekil 11: Sarım sayısının bulunması için diyagram



Şekil 12: Sarım sayısının bulunması için diyagram



Şekil 13 ABB İmalatı kontaktörlerin endüktanslarını bulmaya yarayan diyağram

Kontaktörün taşıyacağı akım $I_T = 1.3 \times 1.15 \times I_n = 1.5 I_n$ In kondansatör grubunun çakacağı akım

kVAR cinsinden güçler ve Maksimum müsaade edilen devreye

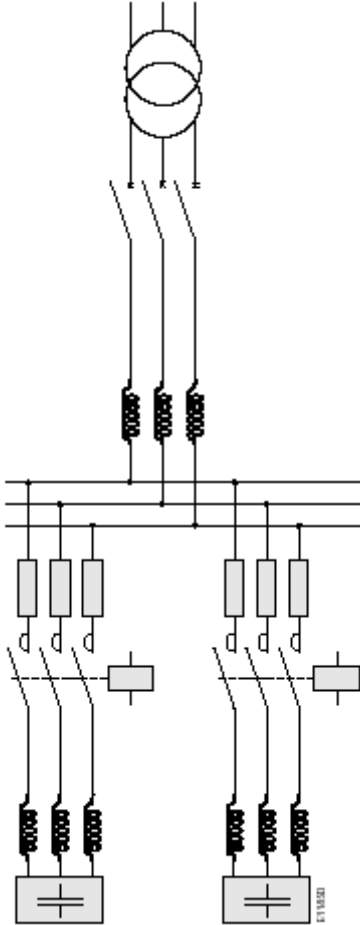
Tipi	50/60Hz ve kVAR olarak güçler														Maksimum izin verilen darbe akımı (kA)		
	230/240 V			400/415 V			440 V		500/550 V			660/690 V			U _e	U _e	
	40 °C	55 °C	70 °C	40 °C	55 °C	70 °C	40 °C	55 °C	70 °C	40 °C	55 °C	70 °C	40 °C	55 °C	70 °C	≤ 500 V	> 500 V
UA 26	12	11	8.5	20	18.5	14.5	22	20	16	22	22	19.5	30	30	25	3	2.7
UA 30	16	16	11	27.5	27.5	19	30	30	20	34	34	23.5	45	45	32	3.5	3.1
UA 50	20	20	19	33	33	32	36	36	35	40	40	40	55	55	52	5	4.5
UA 63	25	25	21	45	43	37	50	48	41	50	50	45	70	70	60	6.5	5.8
UA 75	30	30	22	50	50	39	55	53	43	62	62	47.5	75	75	65	7.5	6.75
UA 95	35	35	29	60/65*	60/65*	50/55*	65	65	55	70	70	60	86	86	70	9.3	8
UA 110	40	39	34	74	70/75*	65	75	75	67	80	80	75	90	90	85	10.5	9

Bu değerler Un=415 V için kullanılır

Tablo 4: Kompanzasyon sisteminde kullanılan ABB yapısı kontaktörlerin karakteristik verileri

Örnek	
Transformator	: 630 kVA 400 V 50 Hz Kısa devre gerilimi uk = 4 %
Kondansatörler	: 20 kVAR lık E grup f 20 kvar
Bağlantılar	: transformator/kondansator :10 m. kablolar: $a_m = 4$ d Kondansatör/baralar : 0,50 m uçken bağlantı 10 mm2 $a_m = 4$ d
Sıcaklık	: $\theta = 40$ °C

$$\bar{I} = k_1 \frac{n-1}{n} \sqrt{\frac{Q_n}{L_n}}$$



L_1 : Transformatorun faz başına endüktansı (Şekil 8) $L_1 = 30 \mu\text{H}$

L_2 : Kesicinin endüktansı (Şekil 11 ve 12) $L_2 = 0.5 \mu\text{H}$

L_3 : Bağlantı endüktansları (Şekil 9) $L_3 = 0.47 \mu\text{H} \times 10 \Rightarrow L_3 = 4.7 \mu\text{H}$

L_x : Eğer gerekirse ilave endüktans (bu örnekte değer 0 dir)
Eğer $L_x \neq 0$ dan farklı ise aynı miktarda L_y ilave endüktans değeri tarafından azaltılır

L_4 : Faz başına bağlantı endüktansları bara/kondansatör (Şekil 9)
 $L_4 = 0.47 \mu\text{H} \times 0.5 \Rightarrow L_4 = 0.24 \mu\text{H}$

L_5 : Sigorta endüktansları $L_5 = 0.4 \mu\text{H}$ Şekil 11 ve 12

L_6 : Kontaktör endüktansı (Şekil 11 ve 12) $L_6 = 0.3 \mu\text{H}$

$$L_n = L_3 + L_4 + L_5 = 0.94 \mu\text{H}$$

L_y : ilave endüktans, eğer gerekirse her faz ve kademe için sahife 9-10 daki ifadeler kullanılacak

Q : Kondansatör gücü (kVAR) (n adet aynı değerde kademe

Kontaktör seçimi (sahife 29)

Şekil 13 den Şebeke minimum endüktansı $L_m = 3.2 \mu\text{H}$

Eğer $L_n \leq L_3 + L_4 + L_5 + \dots \Rightarrow L_y$ ilave endüktansa gerek yok

Eğer $L_n > L_3 + L_4 + L_5 + \dots \Rightarrow$ ilave endüktans $L_y = 3.2 \mu\text{H} - 0.94 \mu\text{H}$

L_y 10mm2 kablodan 3 sarım sarılarak her bir faz için yapılacak, Şekil 12 ye göre $\phi = 20 \times \text{cable}$ diameter

Harmonik Etkilerine karşı Optimum Çözüm Şekilleri

Çözüm aşağıda verilen parametreler göz önüne alınarak yapılır.

- G_h Harmonik üreten cihazların kVA olarak nominal güçlerinin toplamı ,eğer bu cihazların nominal güçleri kW olarak verilmişse güç faktörü 0,7 kabul edilerek güçler kVA ya çevrilecektir.
- S_{sc} Kompanzasyon gruplarının bağlantı terminallerindeki kVA olarak kısa devre gücü
- S_n Devreye bağlı transformatörlerin kVA olarak nominal güçlerinin toplamı

Transformatör veya transformatörler üzerinden beslenen kompanzasyon grupları Herhangi bir güçte transformatör için geçerli genel kural			
$G_h \leq \frac{S_{sc}}{120}$	$\frac{S_{sc}}{120} \leq G_h \leq \frac{S_{sc}}{70}$	$G_h > \frac{S_{sc}}{70}$	
Standard kondansatör	Kondansatör gerilim değeri %10 artırılır (230V üniteler hariç)	Kondansatör gerilim değeri %10 artırılır ve harmonik bastırıcı bobin kullanılır.	
Sn ≤ 2 MVA değerdeki transformatörler için basitleştirilmiş kurallar			
$G_h \leq 0.15 S_n$	$0.15 S_n < G_h \leq 0.25 S_n$	$0.25 S_n < G_h \leq 0.60 S_n$	$G_h > 0.60 S_n$
Standard kondansatör	Kondansatör gerilim değeri %10 artırılır (230V üniteler hariç)	Kondansatör gerilim değeri %10 artırılır ve harmonik bastırıcı bobin kullanılır.	Filtreler

Tablo 5: Kompanzasyon tesislerinde yük ve yükün bağlandığı terdeki kısa devre gücü esas alınarak harmonik etkilerinin belirlenmesi ve harmoniklere karşı alınabilecek pratik tedbirler.

Örnek1 :

%4 nisbi kısa devre gerilimine sahip 500 kVA gücünde transformatöre bağlı olan harmonik üretici cihazların toplam değeri 50 kVA dır.

$$G_h = 50 \text{ kVA}$$
$$S_{sc} = 500 \times \frac{100}{4} = 12,500 \text{ kVA}$$
$$\frac{S_{sc}}{120} = \frac{12,500}{120} = 104$$
$$G_h = 50 \leq \frac{S_{sc}}{120}$$

Çözüm: Standart kondansatör kullanımı

Örnek 2:

%6 nisbi kısa devre gerilimine sahip 1000 kVA gücünde transformatöre bağlı olan harmonik üretici cihazların toplam değeri 220 kVA dır.

$$S_{sc} = 1,000 \times \frac{100}{6} = 16,667 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{sc}}{120} = \frac{16,667}{120} = 139$$

$$\frac{S_{sc}}{70} = \frac{16,667}{70} = 238$$

$$G_h = 220 \cdot \frac{S_{sc}}{120} \text{ ve } \frac{S_{sc}}{70} \text{ arasındadır}$$

Çözüm : 440 V değerinde kondansatör kullanımı

Örnek 3:

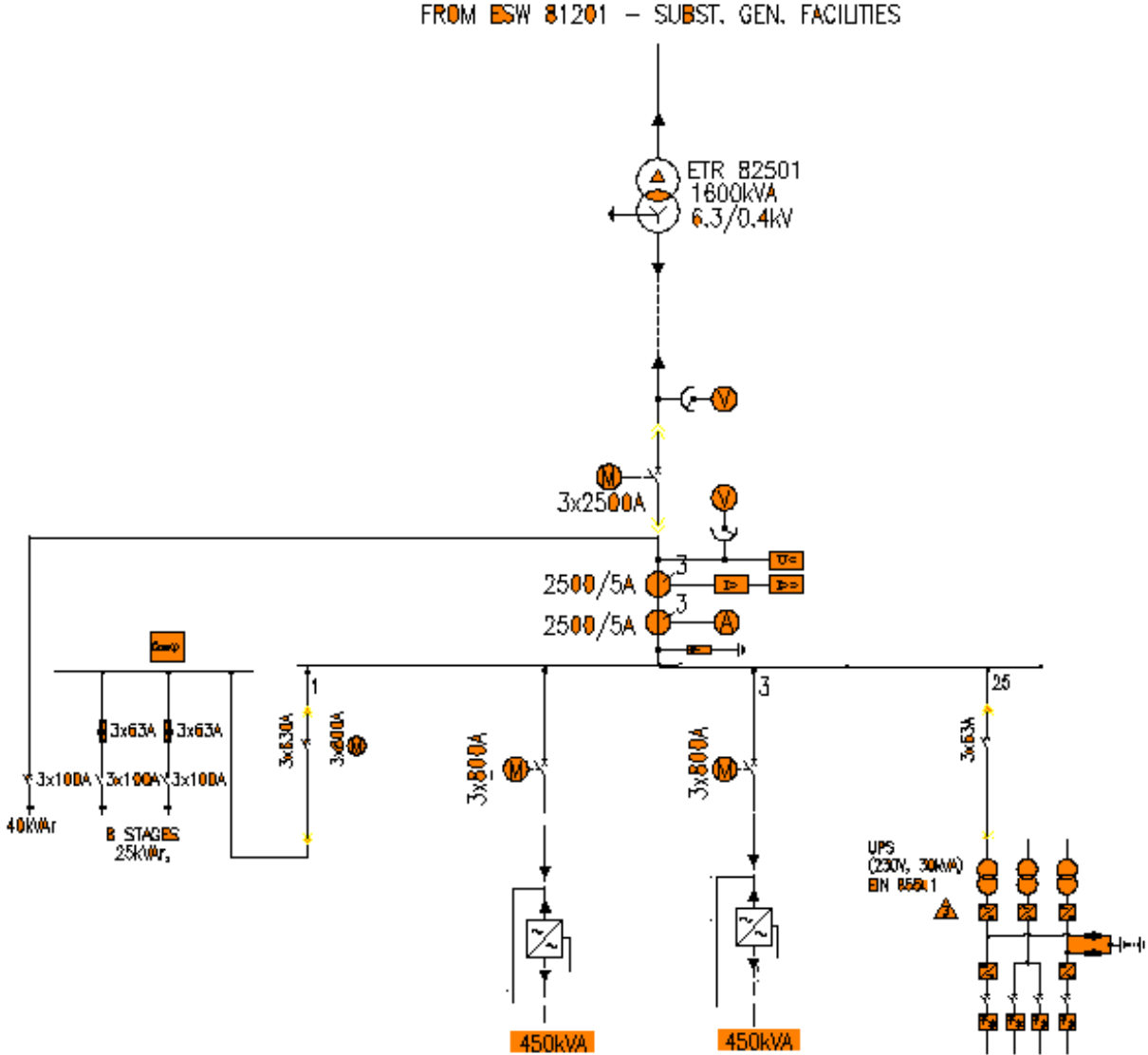
%4 nisbi kısa devre gerilimine sahip 630 kVA gücünde transformatöre bağlı olan harmonik üretici cihazların toplam değeri 250 kVA dır.

$$S_{sc} = 630 \times \frac{100}{4} = 15,750 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{sc}}{70} = \frac{15,750}{70} = 225$$

$$G_h = 250 > \frac{S_{sc}}{70}$$

Çözüm : 440 V değerinde kondansatör ve harmonik bastırıcı bobin kullanmak.



Şekil 15

Şekilde görülen sistem Bakü-Tiflis-Ceyhan ham petrol boru hattı Ceyhan deniz terminali sisteminde yükleme iskelesinde bulunan alçak gerilim transformator dağıtım merkezidir.

Sistemde V.O.C sisteminde bulunan kompresörlerin tahriki için 450kVA gücünde frekans konvertörleri ile 30 kVA gücünde UPS kullanılacaktır.

Freakans konvertörleri ile UPS e ait inverterlerin 6, 12 ,24 darbeli kullanımına göre harmoniklerin sistem üzerinde etkileri incelenecektir

Söz konusu sistemlere ait harmonik miktarları(a harmonik katsayıları)

6 darbeli harmonik bastırıcı bobinsiz

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	63%	54%	10%	6,1%	6,7%	4,8%

6 darbeli harmonik bastırıcı bobinli

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	30%	12%	8,9%	5,6%	4,4%	4,1%

12 darbeli polikon transformatorlu

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	11%	5,8%	6,2%	4,7%	1,7%	1,4%

12 darbeli çift toroidal transformator

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	3,6%	2,6%	7,5%	5,2%	1,2%	1,3%

24 darbeli 2 adet 3 sargılı transformatorlu

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	4,0%	2,7%	1,0%	0,7%	1,4%	1,4%

İncelemede frekans konvertörü ile UPS in inverterinin 6 darbeli ve harmonik bastırıcı bobinsiz olduğu ele alınarak sistemdeki harmonik etkileri incelenecektir.

1. 6 darbeli reaktör bobinsiz sistemin devre de olması durumunda kompanzasyon sistemi incelenecektir

Harmonik üreten sistemlerin toplam gücü

$$S = S_F + S_{UPS} = 450kVA + 30kVA = 480kVA$$

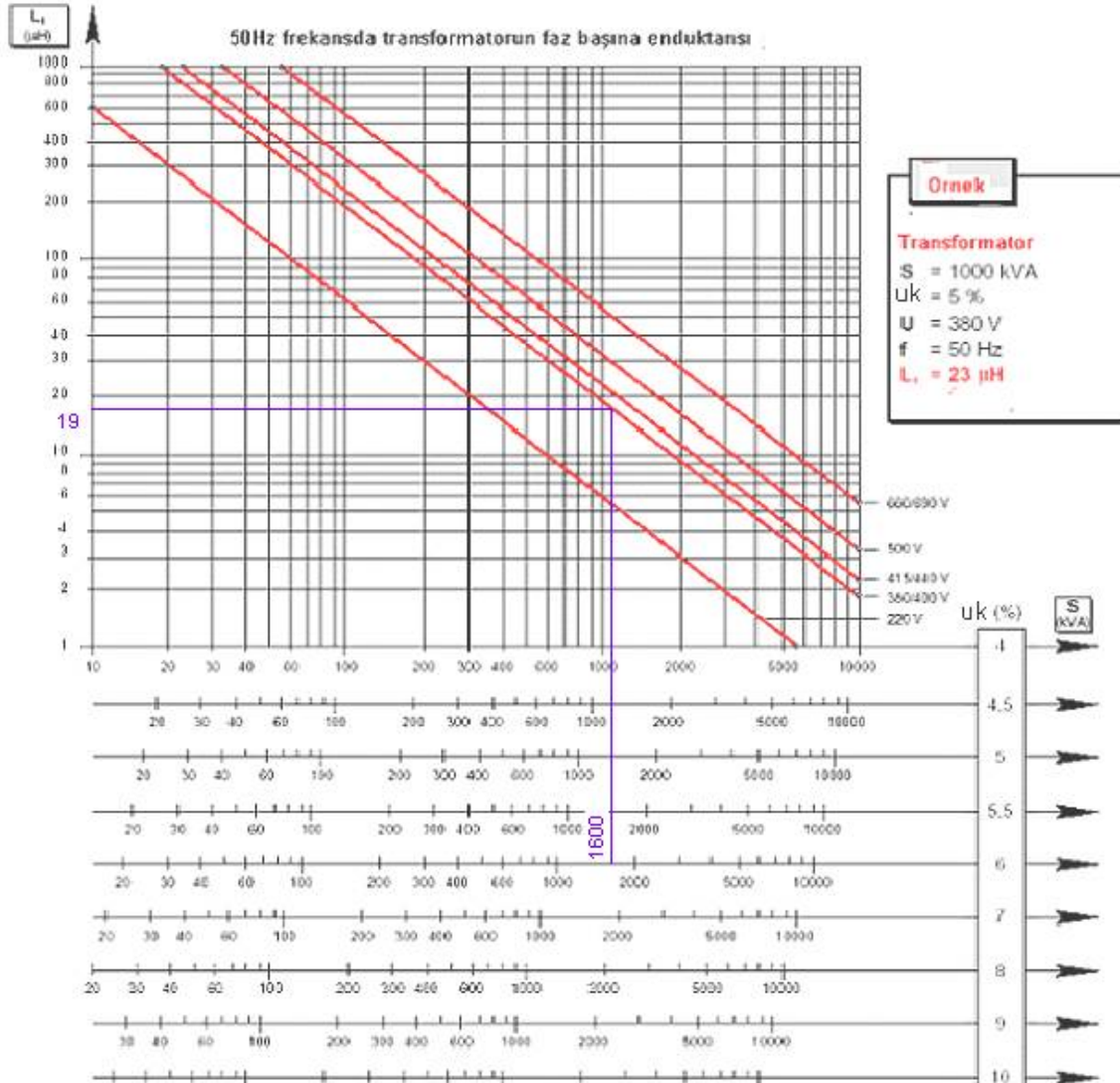
Çekilen akım

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{480 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 693A$$

400 V baralardaki kısa devre gücü 1600 kVA transformatorun kısa devre gücüne eşittir.

$$S_k'' = \frac{S_T}{u_k} = \frac{1600}{0,06} = 26666kVA$$

Transformatorun endüktansı Şekil 8 den $L_t=19$ mikro Henry



Transformatorun 50 Hz şebeke frekansında reaktansı

$$X_T = 2\pi f = 314.19 = 5966\mu\Omega \approx 6m\Omega$$

95 mm² ana bağlantı iletkeninin endüktansı 0,47 μH / m hat uzunluğu 5m olduğu kabul edilirse bağlantı iletkeninin 50Hz frekansta reaktansı

$$X_H = 314.5.0,47 = 738\mu\Omega = 0,74m\Omega$$

Kompanzasyon tesisine ait Kesicinin endüktansı Şekil 11 ve 12 den 0,5 μH

50 Hz de kesicinin reaktansı $X_K = 314.0,5 = 157\mu\Omega = 0,157m\Omega$

Kompanzasyon tesisine kadar toplam şebeke reaktansı $X_{L1} = 6 + 0,74 + 0,15 \approx 6,9m\Omega$

Kompanzasyon grubunun kapasitif reaktansı $X_{C1} = \frac{U_N}{Q_C} = \frac{(0,4)^2}{0,240} \approx 0,67\Omega$

Kompanzasyon grubunun çektiği akım

$$I_{C1} = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X_C} \approx 345A$$

Harmonik akımları

5.harmonik akımı $I_5 = \frac{I}{v} \cdot a = \frac{693}{5} \cdot 0,63 \approx 87A$

7. harmonik akımı $I_7 = \frac{693}{7} \cdot 0,54 \approx 53A$

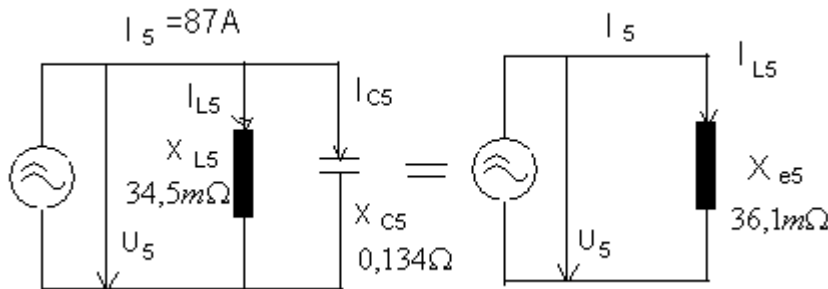
11. harmonik akımı $I_{11} = \frac{693}{11} \cdot 0,1 \approx 6A$

13.harmonik akımı $I_{13} = \frac{693}{13} \cdot 0,061 \approx 4A$

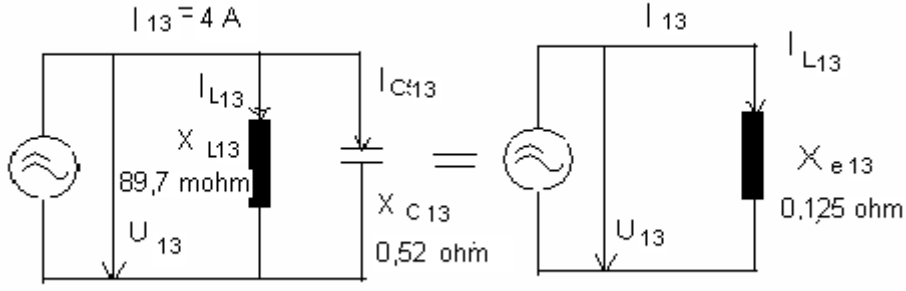
Diğer harmonik etkileri kayda değer bir büyüklük veremeyeceğinden göz ardı edilecektir

5.harmonikmertebedesinde şebekenin reaktansı $X_{L5} = v \cdot X_L = 5.6,9 = 34,5m\Omega$

5. harmonikte kapasitif reaktans $X_{C5} = \frac{X_C}{v} = \frac{0,67}{5} = 0,134\Omega$



Şekil 16:5. harmonik için paralel titreşim devresi



Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans

$$X_{e5} = \frac{1}{\frac{1}{34,5 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{0,134}} \approx 36, m\Omega$$

Gerilimin 5. harmoniğinin efektif değeri $U_5 = I_5 \cdot X_{e5} = 87 \cdot 0,0465 \approx 4,04V$ olacaktır bu ise bara geriliminin

$$u_5 = \frac{U_5}{U_N / \sqrt{3}} = \frac{4,04}{400 / \sqrt{3}} \cdot 100 \approx \%0,6 \text{ olacaktır}$$

Kondansatörün 5.harmonik akım

$$I_{C5} = \frac{U_5}{X_{C5}} = \frac{4,04}{0,134} \approx 30A$$

ve şebekeye verilen akım $I_{L5} = \frac{U_5}{X_{L5}} = \frac{4,04}{34,5 \cdot 10^{-3}} \approx 117A$

$$I_5 = I_{L5} - I_{C5} = 117 - 30 = 87A$$

$X_{L5} \neq X_{C5}$ olduğundan 5. harmonikte rezonans söz konusu değildir.

Burada

$$X_{C1} = v^2 \cdot X_{L1} = 25,6,9 \cdot 10^{-3} = 0,1725\Omega \text{ olursa , veya}$$

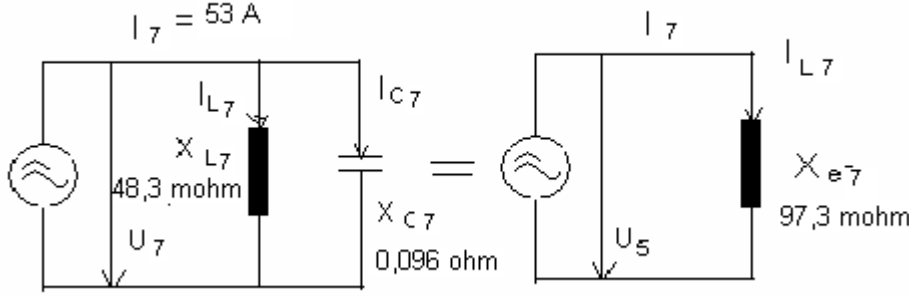
$$Q_{Cr} = \frac{U_N^2}{X_{Cr}} = \frac{(0,4)^2}{0,1725} \approx 0,927MVAR = 927kVAR \text{ gücündeki kompanzasyonda meydana}$$

gelir.

Sonuç 5. harmonikte rezonans olayı meydana gelmez.

7.harmonik mertebesinde şebekenin reaktansı $X_{L7} = v \cdot X_L = 7.6,9 = 48,3m\Omega$

7. harmonikte kapasitif reaktans $X_{C7} = \frac{X_C}{v} = \frac{0,67}{7} = 0,096 \Omega$



Şekil 17: 7. harmonik için paralel titreşim devresi

Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans

$$X_{e7} = \frac{1}{\frac{1}{48,3 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{0,096}} \approx 97,3m\Omega$$

Gerilimin 7. harmoniğinin efektif değeri $U_7 = I_7 \cdot X_{e7} = 53 \cdot 0,0973 \approx 5,16V$ olacaktır bu ise bara geriliminin

$$u_7 = \frac{U_7}{\frac{U_N}{\sqrt{3}}} = \frac{5,16}{400/\sqrt{3}} \cdot 100 \approx \%2,23 \text{ olacaktır}$$

Kondansatörün 7.harmonik akım

$$I_{C7} = \frac{U_7}{X_{C7}} = \frac{5,16}{0,096} \approx 53,8A$$

ve şebekeye verilen akım $I_{L5} = \frac{U_5}{X_{L5}} = \frac{5,16}{48,3 \cdot 10^{-3}} \approx 106,8A$

$$I_7 = I_{L7} - I_{C7} = 106,8 - 53,8 = 53A$$

$X_{L7} \neq X_{C7}$ olduğundan 7. harmonikte rezonans söz konusu değildir.

Burada

$$X_{C1} = v^2 \cdot X_{L1} = 121.6,9 \cdot 10^{-3} = 0,835\Omega \text{ olursa , veya}$$

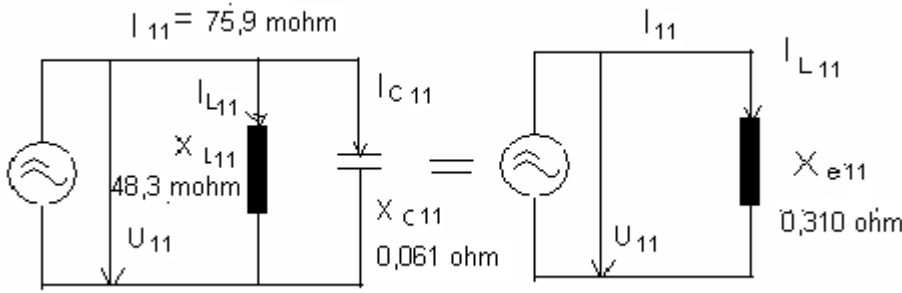
$$Q_{Cr} = \frac{U_N^2}{X_{C1r}} = \frac{(0,4)^2}{0,835} \approx 0,192 \text{ MVAR} = 192 \text{ kVAR} \text{ gücündeki kompanzasyonda meydana}$$

gelir.

Sonuç 11. harmonikte rezonans olayı meydana gelmez.

$$11.\text{harmonik mertebesinde şebekenin reaktansı } X_{L11} = v \cdot X_L = 11 \cdot 6,9 = 75,9 \text{ m}\Omega$$

$$11.\text{ harmonikte kapasitif reaktans } X_{C11} = \frac{X_C}{v} = \frac{0,67}{11} = 0,061 \Omega$$



Şekil 18: 11. harmonik için paralel titreşim devresi

Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans

$$X_{e11} = \frac{1}{\frac{1}{75,9 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{0,061}} \approx -0,310 \Omega$$

Gerilimin 11. harmoniğinin efektif değeri $U_{11} = I_{11} \cdot X_{e11} = 6,0 \cdot 0,310 \approx 1,86 \text{ V}$ olacaktır bu ise bara geriliminin

$$u_5 = \frac{U_5}{U_N / \sqrt{3}} = \frac{1,86}{400 / \sqrt{3}} \cdot 100 \approx \%0,81 \text{ olacaktır}$$

Kondansatörün 11.harmonik akım

$$I_{C11} = \frac{U_{11}}{X_{C11}} = \frac{1,86}{0,061} \approx 30,5 \text{ A}$$

$$\text{ve şebekeye verilen akım } I_{L11} = \frac{U_{11}}{X_{L11}} = \frac{1,86}{75,9 \cdot 10^{-3}} \approx 24,5 \text{ A}$$

$$I_{11} = I_{L11} - I_{C11} = 30,5 - 24,5 = 6 \text{ A}$$

$X_{L11} \neq X_{C11}$ olduğundan **11. harmonikte rezonans söz konusu değildir.**

Burada

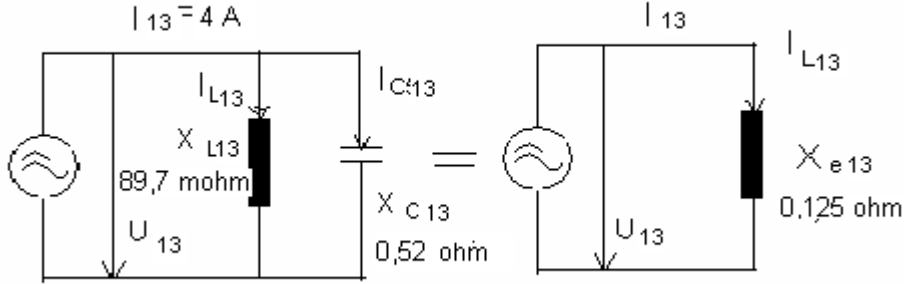
$$X_{C1} = v^2 \cdot X_{L1} = 25.6,9.10^{-3} = 0,1725\Omega \text{ olursa , veya}$$

$$Q_{Cr} = \frac{U_N^2}{X_{C1r}} = \frac{(0,4)^2}{0,1725} \approx 0,927MVAR = 927kVAR \text{ gücündeki kompanzasyonda meydana gelir.}$$

Sonuç 11. harmonikte rezonans olayı meydana gelmez.

$$13.\text{harmonik mertebesinde şebekenin reaktansı } X_{L13} = v \cdot X_L = 13.6,9 = 89,7m\Omega$$

$$13. \text{ harmonikte kapasitif reaktans } X_{C13} = \frac{X_C}{v} = \frac{0,67}{13} = 0,052\Omega$$



Şekil 19: 13. harmonik için paralel titreşim devresi

Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans

$$X_{e11} = \frac{1}{\frac{1}{89,7.10^{-3}} - \frac{1}{0,052}} \approx -0,125\Omega$$

Gerilimin 13. harmoniğinin efektif değeri $U_{13} = I_{13} \cdot X_{e13} = 4.0,125 \approx 0,51V$ olacaktır bu ise bara geriliminin

$$u_5 = \frac{U_5}{U_N/\sqrt{3}} = \frac{0,5}{400/\sqrt{3}} \cdot 100 \approx \%0,22 \text{ olacaktır}$$

Kondansatörün 13.harmonik akım

$$I_{C13} = \frac{U_B}{X_{C13}} = \frac{0,5}{0,125} \approx 40A$$

$$\text{ve şebekeye verilen akım } I_{L13} = \frac{U_{13}}{X_{L13}} = \frac{4,04}{89,7.10^{-3}} \approx 44A$$

$$I_{13} = I_{L13} - I_{C13} = 44 - 40 = 4A$$

$X_{L5} \neq X_{C5}$ olduğundan 13. harmonikte rezonans söz konusu değildir.

Burada

$$X_{C1} = v^2 \cdot X_{L1} = 169.6,9.10^{-3} = 1,166\Omega \text{ olursa , veya}$$

$$Q_{Cr} = \frac{U_N^2}{X_{C1r}} = \frac{(0,4)^2}{1,166} \approx 0,137MVAR = 137kVAR \text{ gücündeki kompanzasyonda meydana}$$

gelir.

Sonuç 13. harmonikte rezonans olayı meydana gelmez.

Kondansatörün çektiği toplam akım

$$I_C = \sqrt{\sum I_{Cv}^2} = \sqrt{345^2 + 30^2 + 54^2 + 30^2 + 40^2} \approx 354 = 1,03 \cdot I_{C1}$$

Bulunan değer uygundur.

Transformatorun söz konusu harmonik üretici cihazlar tarafından yüklenmesi

$$I_L = \sqrt{693^2 + 87^2 + 53^2 + 6^2 + 4^2} = 700A$$

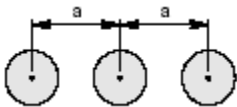
Kompanzasyon Guruplarının devbreye alınması

Sistemde 40 kVAR sabit grup 25 kVAR gücünden oluşan 8 ayrı kademe vardır. En fazla devreye girme akımının meydana geleceği son kademenin devreye girme anındaki darbe akımını 3000 A değerinde olması istenmektedir. Buna göre devreye sokulması gereken endüktansın değeri ve gerekli bobinin sarım sayısı bulunacaktır.

Olması gereken en düşük endüktans 36. ifadeden

$$L_{\min} = \left(\frac{k_1^2}{I^2} \cdot \frac{(n-1)^2}{n^2} \cdot Q_n \right) - L_t = \left(\frac{1475^2}{3000^2} \cdot \frac{(9-1)^2}{9^2} \cdot 240 \right) - 19 \approx 40\mu H$$

bulunur. Kondansatörlerin kademelerinin bağlantısı için 16mm2 kesitinde iletken kullanıldığında



iletken tertibinde a=10cm ve kablo dışçapı d=1,05 cm (tablo2)

Şekil 12 den 40 mikro henry değerinde ilave endüktans elde edebilmek için kablo dış çapının 20 katı büyüklüğünde silindir üzerine 15 sarım yapılacağı bulunur.

Devreye girme akımları (40kVAR sabit grubun üzerine sıra ile 25 kVAR grupların sıra ile devreye girmesi halinde)

$$I_1 = 1475 \cdot \frac{2-1}{2} \cdot \sqrt{\frac{65}{40+6,9}} \approx 867 A$$

$$I_2 = 1475 \cdot \frac{3-1}{3} \cdot \sqrt{\frac{90}{40+6,9}} \approx 1360 A$$

$$I_3 = 1475 \cdot \frac{4-1}{4} \cdot \sqrt{\frac{115}{40+6,9}} \approx 1730 A$$

$$I_4 = 1475 \cdot \frac{5-1}{5} \cdot \sqrt{\frac{140}{40+6,9}} \approx 2036 A$$

$$I_5 = 1475 \cdot \frac{6-1}{6} \cdot \sqrt{\frac{165}{40+6,9}} \approx 2303 A$$

$$I_6 = 1475 \cdot \frac{7-1}{7} \cdot \sqrt{\frac{190}{40+6,9}} \approx 2542 A$$

$$I_7 = 1475 \cdot \frac{8-1}{8} \cdot \sqrt{\frac{215}{40+6,9}} \approx 2760 A$$

$$I_8 = 1475 \cdot \frac{9-1}{9} \cdot \sqrt{\frac{240}{40+6,9}} \approx 2963 A$$

Alçak gerilim kesicilerinin magnetik ani açtırma eşik değerleri 3000 A üzerine ayarlanacaktır.

$$\text{Devrenin zaman sabitesi } T = \frac{L}{R} = \frac{46,9 \cdot 10^{-6}}{1,36 \cdot 10^{-3}} = 0,0345 sn$$

T=6T süresinde akım başlangıç değerinin %5 ine(2963x0,05=148A) düştüğünden sönmeye olayının süresi 207 msn dir.

İlave reaktans olmadığında songrubun devreye girmesi halinde

$$I_8 = 1475 \cdot \frac{9-1}{9} \cdot \sqrt{\frac{240}{6,9}} \approx 7732 A \text{ olacaktır}$$

$$\text{Devrenin zaman sabitesi } T = \frac{L}{R} = \frac{6,9 \cdot 10^{-6}}{1,36 \cdot 10^{-3}} = 0,0046 sn$$

T=6T süresinde akım başlangıç değerinin %5 ine(7732x0,05=386 A) düştüğünden sönmeye olayının süresi 28 msn dir.

KAYNAKLAR.

- **Electrical Devices ABB**
- **Contactors for Capacitor Switching ABB**
- **Design Guide Part E Groupe Schneider**
- **Switchgear Manual ABB**