

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE OLUŞAN
HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİNİN
BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU

Mehmet SUCU
(Teknik Öğretmen, BSc.)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK EĞİTİMİ PROGRAMI

DANIŞMAN
Doç.Dr. Koray TUNÇALP

İSTANBUL 2003

BÖLÜM V

HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ

V.1.GİRİŞ

Elektrik enerji sistemleri üzerinde olumsuz etkileri görülen harmoniklerin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi gerekmektedir. Bunu için iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birincisi, harmonik üreten elemanların imalatı sırasında yapısının harmonik üretmeyecek veya çok az üretecek şekilde tasarlanması veya şebekeye bağlantılarının uygun şekilde yapılmasıdır. Bu yöntem tasarım sırasında alınabilecek önlemler olarak isimlendirilebilir. İkinci yöntem ise, harmoniklerin üretildikten sonra yok edilmesidir. Bu yöntemi de, harmoniklerin filtrelenmesi olarak isimlendirebiliriz.

Bu tez çalışmasının asıl konusu harmoniklerin filtrelenmesi olduğundan, harmoniklerin giderilme yöntemlerinden birincisi olan tasarım sırasında alınabilecek önlemlerden yüzeysel olarak bahsedilecektir. Tasarım sırasında alınabilecek önlemlerin her birisi ayrı bir tez çalışması altında incelenebilecek konulardır. Harmoniklerin giderilmesinin ikinci yolu olan filtreleme konusuna ise ayrıntılı olarak değinilecektir.

V.2.TASARIM SIRASINDA ALINABİLECEK ÖNLEMLER

Tasarım sırasında alınabilecek önlemler iki ana başlık altında toplanabilir. Birincisi, cihaz imal edilirken yapısının harmonik üretmeyecek veya az üretecek şekilde tasarlanmasıdır. Diğer ise, cihazın elektrik enerji sistemine bağlanması sırasında değişik bağlantı şekilleri kullanılarak ürettiği harmoniğin şebekeye verilmemesini veya az oranda verilmesini sağlamaktır. Bölüm II' de harmonik üreten kaynaklar ayrı ayrı incelenirken her harmonik kaynağı için harmonik üretmemesi için alınabilecek önlemlere değinilmiştir. Bu yüzden bu bölümde bu önlemlerden bahsedilmeyecektir.

V.3.HARMONİK FİLTRELERİ

Harmoniklerin oluşturduğu zararlı etkileri engelleyebilmek için tasarım sırasında alınabilecek tedbirler yeterli değildir. Tasarım sırasında alınabilecek tedbirlere ilaveten harmonik akımlarının şebekeye geçmesini engellemekte harmonikleri engellemenin bir diğer yöntemidir. Bunun için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır. Elektrik enerji sistemine yerleştirilen ve istenilen harmonik akımlarının süzülmesini sağlayan bu devrelere "Harmonik Filtresi" denir. [28,29]

Harmonik filtrelerinin amacı akım veya gerilimdeki harmonik mertebelerinin etkilerini azaltmaktır. 2 çeşit harmonik filtresi mevcuttur. Bunlar; Pasif filtre ve Aktif filtredir.

V.4.PASİF FİLTRELER

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok etmek için tasarlanan, kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı durumlarda direnç (R) elemanlarından oluşan devrelerdir.

Pasif filtreler, seri pasif filtreler ve paralel (şönt) pasif filtreler olmak üzere kendi içerisinde ikiye ayrılır. Ayrıca uygulamada çok karşılaşılan bir diğer pasif filtre türü de sistemde bulunan kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamaktır.

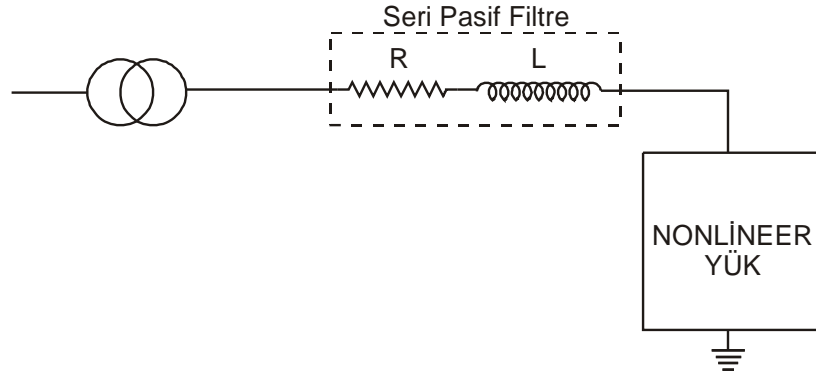
V.4.1. Seri Pasif Filtreler

Seri filtreler adından da anlaşılacağı gibi, kaynak ile harmonik üreten eleman arasına seri olarak bağlanan endüktans (L) elemanından oluşmaktadır. Seri bağlanan bu empedans,

$$X_L = 2\pi f L \quad (V.1)$$

formülüne göre harmonik frekanslarına yüksek empedans göstererek onların geçişlerini engeller. Temel frekansta ise düşük empedans gösterirler. Seri filtre uygulamasına örnek bir devre Şekil V.1’de verilmiştir.

Seri filtreler uygulamada; AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin önlerinde kullanılır. Seri filtrelerinin uygulanmasındaki zorluk; tüm yük akımı filtre üzerinden geçmekte, tam hat gerilimleri için yalıtılması gerekmekte ve hatta gerilim düşümüne sebep vermesidir. [29]



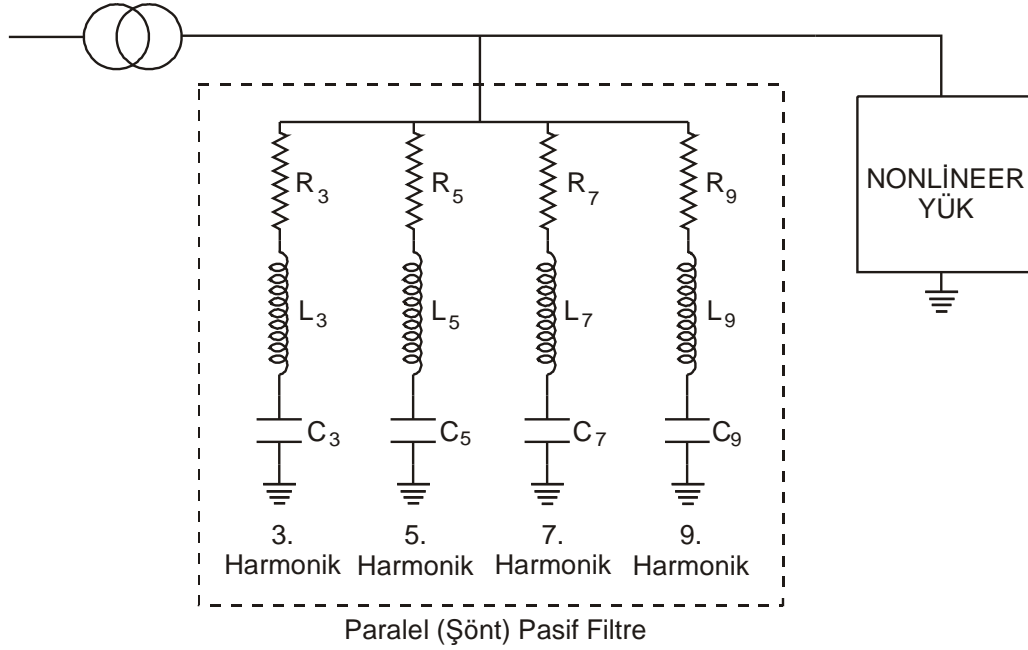
Şekil V.1. Seri Pasif Filtre İçin Bir Örnek

V.4.2. Paralel (Şönt) Pasif Filtreler

Paralel (şönt) pasif filtreler, harmonik kaynağı ile şebeke arasına kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı durumlarda direnç (R) elemanlarının paralel olarak bağlanmasından oluşan devrelerdir.

Paralel pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik frekansı için rezonansa gelecek L, C değerleri hesaplayarak bu devreyi güç sistemine bağlamaktır. Her bir harmonik frekansı için ayrı rezonans kolları oluşturularak bu kolların güç sistemine bağlanması gerekmektedir. Ancak bu işlem en etkin yani

genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Her harmonik bileşeni için ayrı bir rezonans kolu oluşturmak optimum bir çözüm olmayacağından sadece genlik değeri yüksek harmonik frekansları için rezonans kolu oluşturulmalı, genliği yüksek olmayan harmonik frekansları için ise bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterli olacaktır. [29] Pasif filtre için örnek bir devre (Tek ayarlı paralel pasif filtre) Şekil V.2’de görülmektedir.



Şekil V.2. Pasif Filtre İçin Bir Örnek (Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre)

Burada;

R_n : n . harmonik mertebesi için rezonansa getirilen kapasite ve endüktans elemanının iç direnci (Ω),

X_{L_n} : n . harmonik mertebesi için kapasite elemanı ile rezonansa sokulan endüktans (Ω),

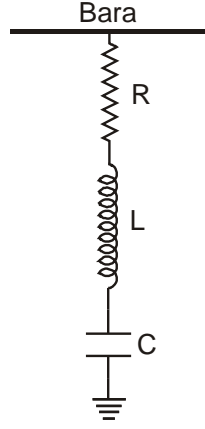
X_{C_n} : n . harmonik mertebesi için endüktans elemanı ile rezonansa sokulan kapasitansdır (Ω).

Şönt filtrelerin kullanılmasının en büyük sakıncası, güç sistemiyle paralel rezonansa girebilmesidir. Bu yüzden güç sistemine paralel pasif filtre uygulanmadan önce sistemin ayrıntılı bir analizinin yapılması gerekmektedir. 4 farklı paralel pasif filtre çeşidi vardır;

- ◆ Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler,
- ◆ Çift ayarlı filtreler,
- ◆ Otomatik ayarlı filtreler,
- ◆ Yüksek geçiren sönümlü filtreler.

V.4.2.1 Tek Ayarlı (Bant Geçiren) Filtreler

Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler, tek bir frekanstaki harmonik akımı için bir kısa devre yol oluşturarak bu akımın hattan saptırılmasını sağlar. [29] Tek ayarlı filtreler seri $R-L-C$ devresinden meydana gelir. Tek ayarlı filtre örneği Şekil V.3'de görülmektedir.



Şekil V.3. Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre

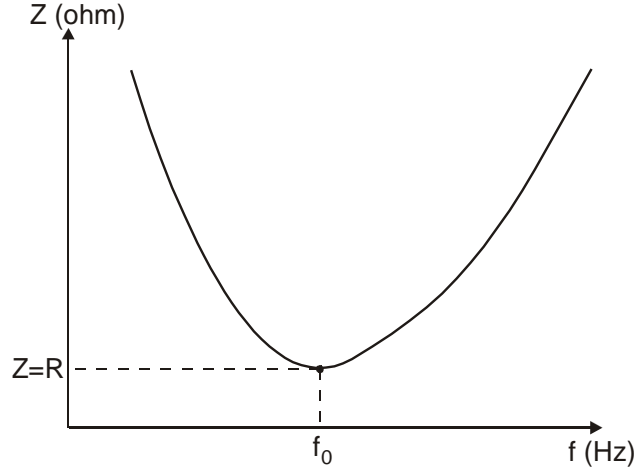
Tek ayarlı filtrenin, temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarındaki filtre empedansı,

$$Z_T = R + j(X_L - X_C) = R + j\left(2pf_n L - \frac{1}{2pf_n C}\right) \quad (V.2)$$

şeklindedir. Bu filtrenin çalışma prensibi, istenen harmonik frekansında filtrenin rezonansa gelerek $X_L = X_C$ şartının sağlanmasıdır. Bu durumda filtre empedansı (ayarlandığı harmonik frekansındaki empedansı),

$$Z_{T0} = R \quad (V.3)$$

olur. Yani filtre ayarlanan frekans için minimum empedans değerini gösterir ve ayarlanan frekanstaki harmonik toprağa akar. Tek ayarlı filtrenin frekans-empedans ilişkisi Şekil V.4'de görülmektedir.



Şekil V.4. Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi

Burada,

Z_T : Temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarında tek ayarlı filtrenin empedansı (Ω),

R : Tek ayarlı filtredeki endüktans ve kapasitansın iç direnci (Ω),

X_L : Tek ayarlı filtrenin endüktif reaktansı (Ω),

X_C : Tek ayarlı filtrenin kapasitif reaktansı (Ω),

f_n : n . harmonikte ki frekans (Hz),

L : Tek ayarlı filtrenin endüktansı (H),

C : Tek ayarlı filtrenin kapasitansı (F),

Z_{T0} : Tek ayarlı filtreni istenen harmonikte rezonansa gelmesi sonucu oluşan empedans (Ω),

f_0 : Tek ayarlı filtrenin ayarlandığı harmonik frekansı, yani rezonans frekansıdır (Hz).

Tek ayarlı filtre seri rezonans ilkesine göre çalıştığı için bu filtrelerde $X_L = X_C$ şartı aranmaktadır. Bu X_L ve X_C değerleri sisteme uygun seçilmelidir. Tek ayarlı filtreler sisteme uygulandığında filtredeki kapasite, sistemin temel

frekansı ve ayarlanan harmonik frekansı dışındaki frekanslarda sistemde kompanzasyon etkisi göstereceğinden filtre hesaplanırken, filtrede kullanılacak kapasite değeri sistemin kompanzasyon ihtiyacını karşılayacak değerde belirlenmeli ve daha sonra bu değerle rezonansa gelecek endüktans değeri hesaplanmalıdır. [29] Bu hesaplamalar aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmelidir.

Öncelikle sistemin reaktif güç ihtiyacı belirlenmelidir. Bunu için,

$$Q = P(\tan j_1 - \tan j_2) \quad (V.4)$$

formülünden yararlanılır. Burada,

Q : Sistemin istenilen güç faktörü değerine ulaşabilmesi için sisteme bağlanması gereken kondansatörün gücü (Var),

P : Sistemin toplam aktif gücü (W),

$\tan j_1$: Sistemin kompanzasyon yapılmadan önceki güç açısının tanjantı,

$\tan j_2$: Sistemde kompanzasyon uygulandıktan sonraki elde edilmek istenen güç açısının tanjantıdır.

Denklem V.4'den hesaplanan kompanzasyon gücünden sonra,

$$X_{cr} = \frac{U^2}{Q} \quad (V.5)$$

formülünden sisteme bağlanması gereken kondansatörün kapasitif reaktansı belirlenmelidir. Burada,

X_{cr} : Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri (Ω),

U : Sistemin çalışma gerilimidir (V).

Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri hesaplandıktan sonra bu değer; sistemdeki etkin harmonik mertebelerine göre ayrı ayrı ayarlanan tek ayarlı filtreler, üzerlerinden akacak akımlara göre orantılı olarak dağıtılmalıdır. Daha

sonra her filtre kademesi için bilinen X_C değerine karşılık gelen X_L değeri filtrenin ayarlandığı harmonik frekansına göre hesap edilerek sisteme monte edilmelidir.

Tek ayarlı filtreye ait hesap örneği ve simülasyon çalışması son bölümde verilmiştir.

Tek ayarlı filtrelerin olumlu özellikleri şunlardır:

- ◆ Eğer istenerek eklenmiş bir direnç yoksa kayıplar çok azdır.
- ◆ Ayarlanan harmonik frekansı için harmonik akımına sığa yakın bir empedans gösterir.
- ◆ Filtre edilecek birden fazla harmonik akımı için birden fazla filtre paralel kullanılabilir.

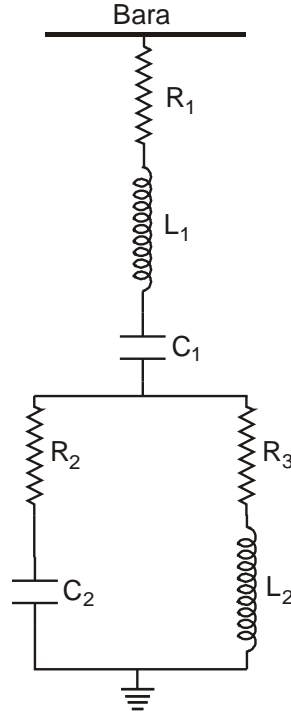
Tek ayarlı filtrelerin olumsuz yanları ise:

- ◆ Hassas yapılan hesaplamalarından dolayı filtreyi oluşturan elemanların değerinde zamanla oluşan değişimlere karşı oldukça duyarlı olmasıdır. Bu durum ilave kondansatör ve direnç değerleri ile giderilebilir.
- ◆ Tek ayarlı filtreler sadece gücü sabit olan nonlineer yüklü sistemlerde kullanılabilir. Çünkü, üzerlerindeki kapasite değerleri değişken olmadığından sistemdeki endüktif yükler kalktığından kondansatörler devrede kalmaya devam edeceğinden bu durumda aşırı kompanzasyon oluşabilir. Veya nonlineer yüklerden bir kısmı devreden çıktığında, örneğin sistemdeki 5. harmoniğin büyük bir kısmını oluşturan yük devreden çıktığında 5. harmoniği süzen tek ayarlı filtre kolu sistemde kalacağından bu kol enerji kaybına yol açacaktır. Bu yüzden bu filtreler sabit nonlineer yüklerin bulunduğu sistemlerde kullanılmalıdır. Sabit yük devreden çıktığında tek ayarlı filtrelerde devreden çıkarılmalıdır.

V.4.2.2 Çift Ayarlı Filtreler

Çift ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı iki adet tek ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı ile aynıdır. Çift ayarlı filtre iki farklı harmoniği elimine edebilir. Çift ayarlı filtre Şekil V.5'de gösterilmiştir.

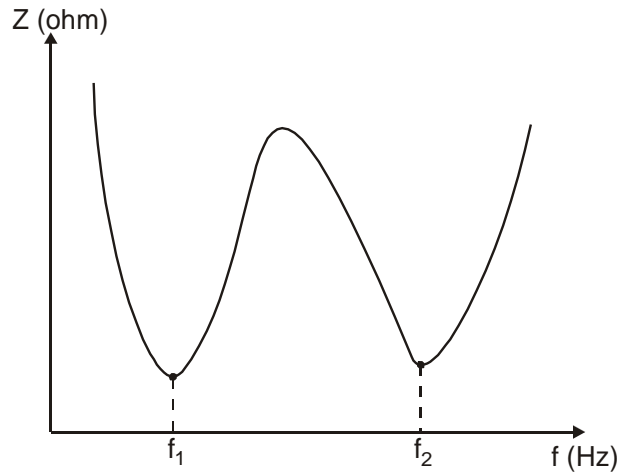
Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının az olması bu filtrelerin en önemli özelliğidir.



Şekil V.5. Çift Ayarlı Paralel Pasif Filtre

Çift ayarlı filtrelerin frekans-empedans ilişkisi Şekil V.6'da verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki Çift ayarlı filtrenin iki farklı rezonans noktası vardır (iki adet tek ayarlı filtrenin birleşiminden meydana gelmesinden dolayı). [29]

Üç ve dört ayarlı filtrelerde tasarlamak mümkündür, ancak bunlar ayar zorluklarından dolayı kullanılmazlar.



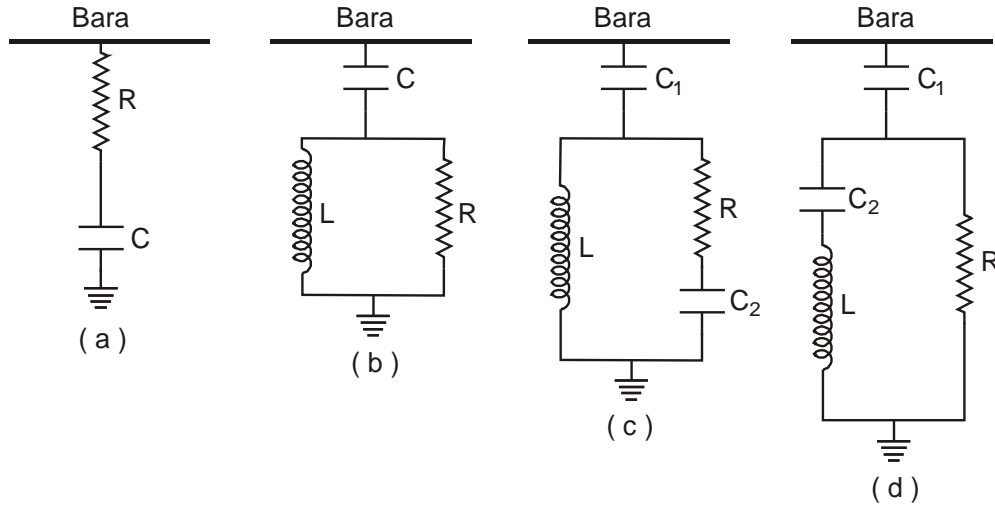
Şekil V.6. Çift Ayarlı Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi

V.4.2.3 Otomatik Ayarlı Filtreler

Bu filtrelerin ayarlanabilir olması, hem kapasitenin hem de endüktansın otomatik olarak ayarlanması ile gerçekleştirilebilir. Bu ayarın sınırları $m\%5$ gibi bir değerdir. Bu filtreler, reaktif gücü ölçen ve bu gücün işaretine ve büyüklüğüne göre L ve C değerlerini kontrol eden bir kontrol sisteminden oluşmaktadır. [29]

V.4.2.4 Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

Yüksek geçiren filtreler, belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans gösteren filtrelerdir. Bu filtrelerin tek ayarlı filtreler ile birlikte kullanılması uygundur. Tek ayarlı filtreler yüksek genlik değerine sahip düşük harmonik frekanslarını her harmonik için farklı paralel kollarla süzerken, yüksek geçiren filtreler genlik değeri düşük yüksek harmonik frekanslarını tek bir paralel kol yardımı ile süzerler. 4 farklı çeşit yüksek geçiren filtre mevcuttur, bunların birbirlerine göre çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Yüksek geçiren filtre çeşitleri Şekil V.7’de verilmiştir.



Şekil V.7. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler (a) Birinci Derece, (b) İkinci Derece, (c) Üçüncü Derece, (d) C Tipi

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; büyük bir kondansatör gücü gerektirdiğinden ve temel frekansta aşırı bir kayba sebep olduğundan tercih edilmezler.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; en iyi filtreleme performansına sahip olan filtredir. Fakat, Üçüncü dereceden filtre ile karşılaştırıldığında daha yüksek temel frekans kayıplarına sahiptir.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; ikinci dereceye göre en büyük avantajı, C_2 kondansatöründen dolayı temel frekansta empedansının artmasına karşılık bu frekansta kayıpları önemli ölçüde azaltılmış olmasıdır.

C tipi yüksek geçiren sönümlü filtre; bu filtrenin filtreleme performansı, ikinci ve üçüncü derecen filtrelerin filtreleme performansı arasındadır. Temel avantajı, C_2 ve L seri olarak bağlandığından temel frekansta kayıplarının düşük olmasıdır. Bu tip filtreler, temel frekanstaki sapmalar ve elemanların değerlerinin zamanla değişmelerine karşı oldukça hassastır.

Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde elemanların seçimi tek ayarlı filtrelerdeki gibi yapılır. Ancak, yüksek geçiren sönümlü filtrelerdeki direnç değerini hesaplayabilmek için kalite faktörü adında bir eşitliğin tanımlanması gerekmektedir. Bu eşitlik,

$$K = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (V.6)$$

şeklindedir. Burada;

K : Kalite faktörü (0,5 ile 2 arasında sabit bir katsayı),

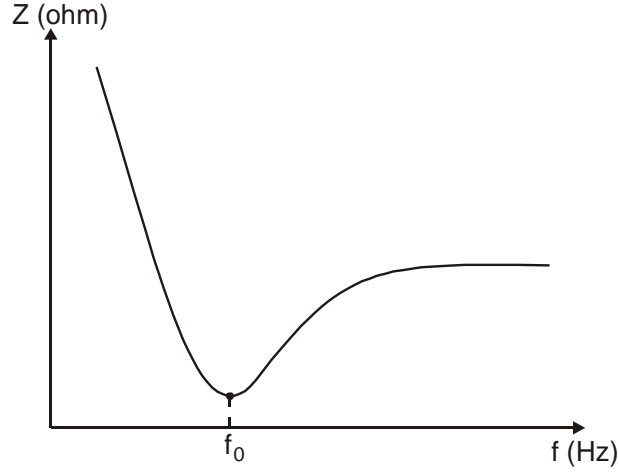
R : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılacak direnç değeri (Ω),

X_L : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan endüktif reaktans değeri (Ω),

X_C : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan kapasitif reaktans değeridir (Ω).

Yüksek geçiren bir filtrenin frekans-empedans ilişkisi Şekil V.8'de verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki filtre belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans göstererek yüksek mertebeli harmoniklerin sistemden uzaklaşmasını sağlamaktadır.

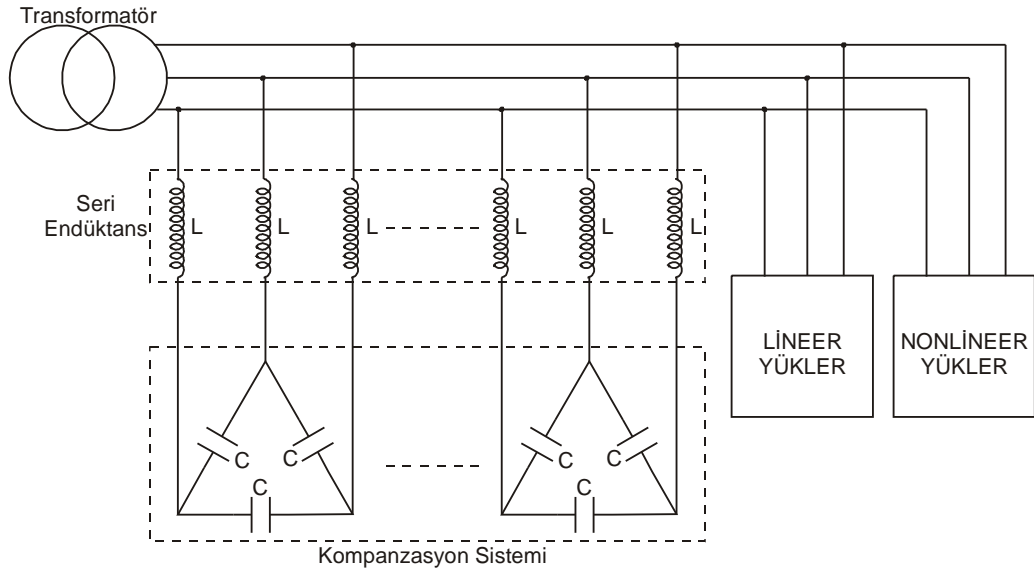
[2]



Şekil V.8. Yüksek Geçiren Sönümlü Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi

V.4.3. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak

Bu yöntem harmonikleri önlemede en etkisiz yöntemlerden biridir. Ancak en ucuz ve en kullanışlı olanıdır. Bu yöntemin prensip şeması Şekil V.9’da verilmiştir.



Şekil V.9. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak

Harmoniklerin, elektrik enerji sistemlerindeki gözle görülen en büyük etkisi kompanzasyon sistemleri üzerinde meydana gelmektedir. Harmonikler kondansatörlerin kapasitesinde değişmelere yol açmakta ve ömürlerini azaltmaktadır. Bu etkileri azaltabilmenin en pratik ve en ekonomik yolu kompanzasyon sistemine

seri endüktans bağlamaktır. Böylece, harmonikli akımlara karşı seri endüktans sayesinde yüksek empedans gösterilerek kompanzasyon sistemine geçmesi önlenmekte ve bu seri endüktansla kompanzasyon sisteminin kapasitansı bir filtre görevi görerek harmoniklerin etkinliğini azaltmaktadır.

Bu sistemler tesis edilirken seçilecek olan endüktanslara, her firmanın kendi endüktansları için hazırladığı tablolara bakılarak karar verilmektedir. Bu seçim için bazı kriterler vardır. Bunların en önemlisi p faktörüne karar vermektir. Bu faktör;

$$p = \frac{X_L}{X_C} \quad (V.7)$$

eşitliğinden belirlenmektedir. Burada;

X_L : Kompanzasyona seri bağlanacak olan endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansı (Ω),

X_C : Kompanzasyon sisteminin temel frekanstaki kapasitif reaktansıdır (Ω).

p faktörü sistemde etkin olan harmonik derecesine göre seçilmelidir. Örneğin; sistemde 3. harmonik baskın ise bu sistemi 189 Hz de rezonansa getirecek (endüktans ve kompanzasyon sistemi arasındaki seri rezonans) p değeri %7 olan endüktanslar seçilmelidir, sistemde 5. harmonik baskın ise bu sistemi 210 Hz de rezonansa getirecek p değeri %5,67 olan endüktanslar seçilmelidir. Bundan maksat, örneğin 3. harmoniği baskın olan sistemde sistemi 3. harmoniğin frekansı olan 150 Hz de rezonansa getirirsek bu durumda 3. harmoniğin bütün genliği kompanzasyon sistemine akacaktır, buda kompanzasyon sistemine zarar verecektir. Bu yüzden sistem, sistemde mevcut olan baskın harmoniğin frekansına yakın frekanslarda rezonansa getirilmekte ve böylece sistemde baskın olan harmoniğin genliği önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu, baskın olmayan diğer harmonik mertebeleri üzerinde de etki göstereceğinden sistemdeki THD seviyesi önemli ölçüde düşecektir.

Yukarıda bahsedilen, 3. harmonik için 189 Hz, 5. harmonik için 210 Hz değerleri zamanla uygulamadan kazanılan tecrübelerden elde edilmiş verilerdir.

Tablo V.1'de Hilkar Elektroteknik Ltd. Şti.'den alınan kompanzasyon sistemi için endüktans seçim tablosu verilmiştir.

Kompanzasyon sistemine seri bağlanan endüktanslar, kompanzasyon uçlarındaki gerilimin bir miktar yükselmesine sebep olmaktadır. Bunun sebebi, kompanzasyon sisteminden akan akım sınırlandırıldığından azaldığı için uçlarındaki gerilim yükselecektir (gücün sabit kalmak istemesinden dolayı). Bu yüzden sistem için seçilen kapasitanslar şebeke geriliminden daha büyük gerilimlere dayanıklı olmalıdır. Bu;

$$U_c = \frac{U}{1-p} \quad (V.8)$$

ile hesaplanabilir. Burada;

U_c : Kapasitans gerilimi (V),

U : Şebeke gerilimi (V),

p : Denklem V.7’de tanımlanan sabit değer.

Tablo V.1. Kompanzasyon Sistemine Seri Bağlanacak Endüktanslar İçin Seçim Tablosu [30]

Kondansatör Gücü (kVAr) 50 Hz.			Kondansatör Kapasitesi (μ F)	Bobinin Endüktansı (mH)		Nominal Akım (A)	Reaktörün Gücü (W)
400 V	440 V	525 V		p=%5,67	p=%7		
5	6	9,6	3x33	6,12	7,66	7,65	50
10	12	17,2	3x66	3,06	3,84	15,3	65
15	18	25,8	3x89	2,04	2,56	23	76
20	24	34,4	3x133	1,53	1,92	30,6	100
25	30,2	43	3x166	1,22	1,53	38	130
30	36,3	51	3x186	1,02	1,28	46	140
40	48,4	68	3x266	0,76	0,96	61	150
50	60,5	86	3x333	0,61	0,77	76,5	160

Şebeke gerilimi 400 V olan bir sistemde p değeri %5,67 olan bir endüktanslar seçilmişse, bu durumda kapasitansların gerilimi 425 V seçilmelidir. Ancak, 425 V’da çalışabilecek şekilde seçilen kapasitanslar üzerlerinde yazılı olan reaktif gücü bu gerilim altında verebilirler. Eğer kapasitanslar daha düşük gerilim ile çalışırlar ise yeni güçleri,

$$Q_2 = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 Q_1 \quad (V.9)$$

ile hesaplanmalıdır. Burada;

Q_1 : Kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi altında üreteceği reaktif güç (VAr),

Q_2 : Gerilimin değişmesi sonucunda kompanzasyon sisteminin üreteceği reaktif güç (VAr),

U_1 : Kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi (V),

U_2 : Değişen gerilimin değeridir (V).

Ayrıca, kompanzasyon sistemi seri bağlı reaktörlerin tükettiği

$$Q_L = 3I^2 X_L \quad (V.10)$$

reaktif güç kadar daha az reaktif güç sisteme verecektir. Burada;

Q_L : Seri endüktansların tükettiği reaktif güç (VQr),

I : Seri endüktans üzerinden akan akım (A),

X_L : Seri endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansıdır (Ω).

Harmoniklerin elimine edilmesi için kullanılan, kompanzasyon sistemine seri reaktans bağlamaya ait simülasyon örneği son bölümde verilmiştir.

V.5.AKTİF GÜÇ FİLTRELERİ

Elektrik enerji sistemlerindeki harmoniklerin giderilebilmesi için, düşük maliyetleri yüzünden çoğunlukla pasif filtreler kullanılmaktadır. Ancak uygulamada pasif filtrelerin birçok dezavantajı vardır. Bunlar;

- ◆ Filtrede kullanılan elemanların (kondansatör, bobin ve direnç), zamanla değerinde sapmalar olacağından ve buna bağlı olarak filtrenin ayar frekansı da sapacağından filtreleme işlevinde azalmalar olur,
- ◆ Zamanla sistemdeki nonlineer yükler arttığında filtre buna bağlı olarak aşırı yüklenerek zarar görebilir,
- ◆ Güç sistemindeki elemanlarla filtre elemanları arasında farklı harmonik frekanslarında seri veya paralel rezonans meydana gelebilir,

Bu olumsuz etkilerden dolayı, ilerleyen yarı iletken teknolojisi ve kontrol sistemleri sayesinde Aktif Güç Filtreleri geliştirildi.

Aktif güç filtreleri, güç sisteminde nonlinear yüklerin ürettiği harmoniklerle aynı genlikte fakat ters fazda bir akımı güç sistemine enjekte ederek çalışır. Bunu yapabilmek için, güç elektroniği anahtarlama elemanlarını ve sistemdeki harmonikleri belirleyerek anahtarlama elemanını sürebilmek için çeşitli kontrol düzenleri kullanır.

Aktif güç filtreleri ile sisteme enjekte edilen akım, sistemdeki harmoniklerin etkinliğini azaltır. Bu, nonlinear yüklerin şebekeden çekmek istediği harmoniklerin aktif güç filtresi ile karşılanması anlamına gelir.

Aktif güç filtreleri sistemdeki harmonikleri yok etmek için kullanılmasının yanında, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim ve akım dengesizlikleri, nötr akımı kompanzasyonu ve şebeke geriliminin regülasyonu içinde kullanılırlar. [31,32]

V.5.1. Aktif Filtre İle Pasif Filtrenin Karşılaştırılması

Aktif filtre ile pasif filtreyi karşılaştırıldığında, aktif filtrenin pasif filtreye nazaran üstünlüklerini maddeler halinde şöyle sıralayabiliriz;

- ◆ Aşırı yüklenme riskinin olmaması,
- ◆ Her türü yük durumu için uyumluluk,
- ◆ Sistemdeki nonlinear yüklerin artması sonucunda aktif filtrenin de büyütülmesi kolay ve pratik,
- ◆ Tüm harmonikler yada seçilen harmonikler tümüyle yok edilebilir,
- ◆ Sistemle rezonansa girmesi mümkün değildir. [29,32]

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli durumlardaki davranış biçimleri karşılaştırmalı olarak Tablo V.2'de verilmiştir.

V.5.2. Aktif Filtre Türleri

Aktif filtreler, seri ve paralel aktif filtreler olmak üzere ikiye ayrılır.

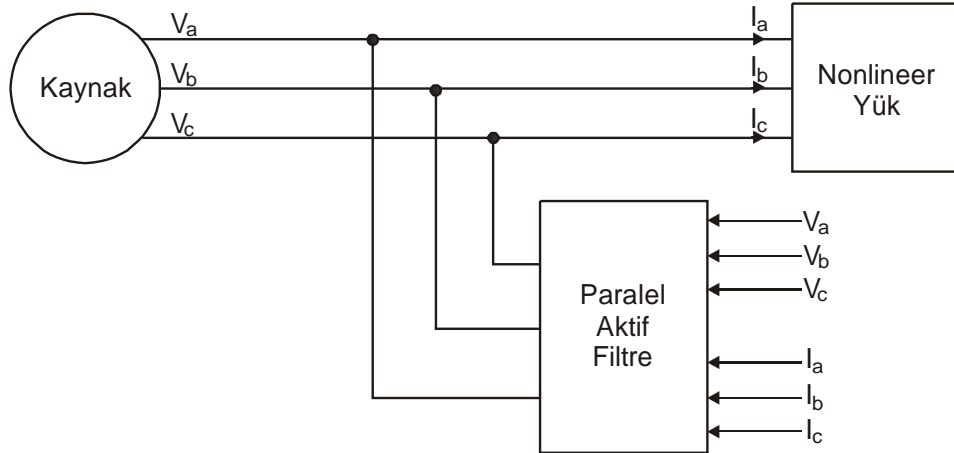
V.5.2.1 Paralel Aktif Filtre

Paralel aktif filtre adından da anlaşılacağı gibi sisteme paralel bağlı olarak çalışır. Yükün çektiği harmonikli akımları tanımladıktan sonra bunlarla aynı genlikte

fakat ters fazdaki akımları sisteme enjekte eder. Paralel aktif filtre, akım kaynağı gibi davranan nonlineer yükler için etkilidir. Paralel aktif filtre akım ile ilgili kompanzasyonları (reaktif güç kompanzasyonu, akım dengesizlikleri) yapar. [29,32] Paralel aktif filtrenin yapısı Şekil V.10'da görülmektedir.

Tablo V.2. Aktif Filtre İle Pasif Filtrenin Karşılaştırılması [29,32]

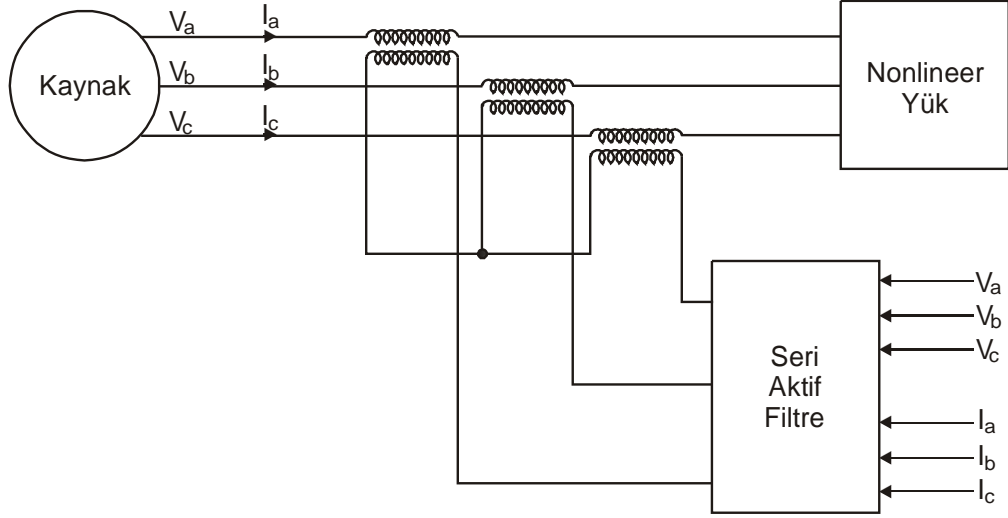
KONU	PASİF FİLTRE	AKTİF FİLTRE
Harmonik Akımlarının Kontrolü	Her harmonik frekansı için bir filtre ister	Aynı anda birçok harmonik akımının kontrolü mümkündür
Harmonik frekanslarının değişiminin etkisi	Filtrenin etkinliği azalır	Etkilenmez
Empedans modifikasyonu etkisi	Rezonans riski vardır	Etkilenmez
Akım Yükselmesi Riski	Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır.	Aşırı yüklenme riski yoktur
Sisteme yeni yük ilave edilmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir	Herhangi bir probleme yol açmaz
Sistemdeki temel dalganın frekans değişimi	Ayarlanması mümkün değil (değiştirilmesi gerekir)	Ayar ile uyum mümkün
Boyutlar ve ağırlık	Harmonik genliğine ve derecesine göre çok değişken	Oldukça küçük
Maliyet	İlk maliyet çok düşük ama bakım yüksek	İlk maliyet çok yüksek ama bakım gerektirmez



Şekil V.10. Paralel Aktif Filtrenin Prensip Şeması

V.5.2.2 Seri Aktif Filtre

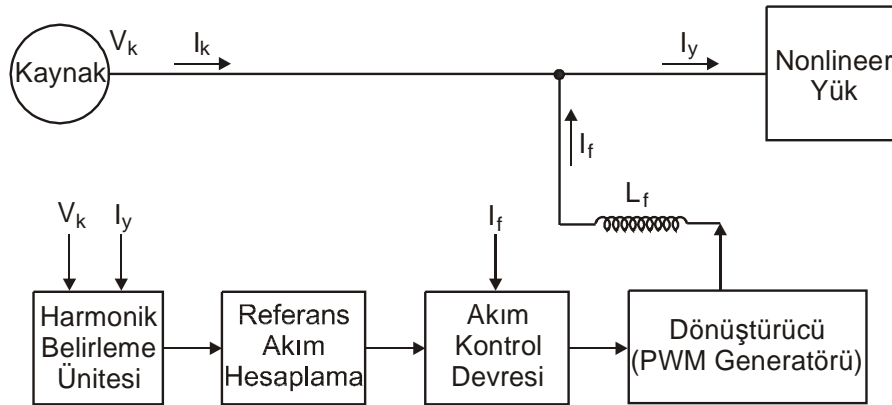
Seri aktif filtreler sisteme bir transformatör ile bağlanır. Seri aktif filtre ile gerilim harmonikleri elimine edilir. Harmonikli gerilim kaynağı gibi davranan kaynaklar için etkilidir. Seri aktif filtre ile gerilime bağlı kompanzasyonlar (gerilim dengesizlikleri, dalgalanmaları ve regülasyonu) gerçekleştirilir. Yapısı Şekil V.11’de görülmektedir. [29,32]



Şekil V.11. Seri Aktif Filtrenin Prensi Şeması

V.5.3. Aktif Güç Filtresinin Yapısı

Aktif güç filtresi, dönüştürücü (PWM Generatörü), akım kontrol devresi ve harmonik belirleme bloğu olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. [32]



Şekil V.12. Aktif Güç Filtresinin Blok Şeması [32]

Şekil V.12'ye göre;

V_k : Kaynak gerilimi (V),

I_k : Kaynak akımı (A),

I_y : Yük akımı (A),

I_f : Aktif güç filtresi akımı (A),

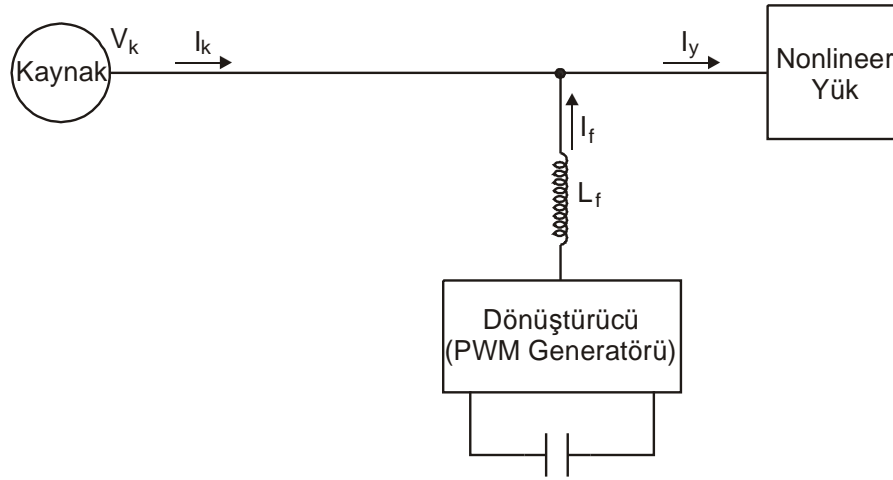
L_f : kaynak uçlarındaki gerilim ile filtre tarafından üretilen PWM (Darbe genişlik modülasyonu) gerilimi arasında tampon görevi gören endüktanstır (L).

V.5.3.1 Dönüştürücü (PWM Generatörü) Bloğu

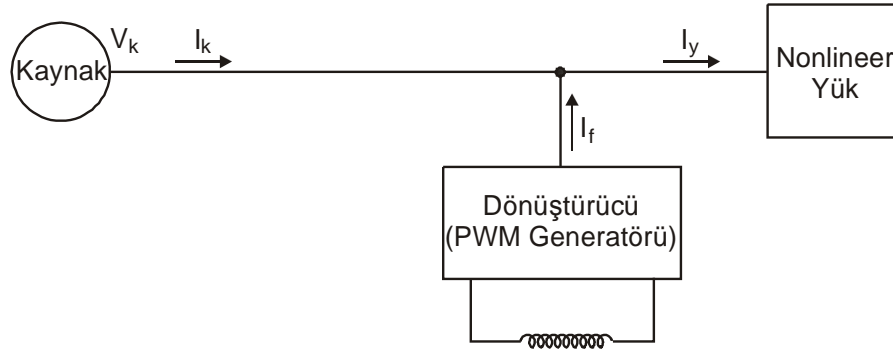
Dönüştürücü bloğu, akım beslemeli veya gerilim beslemeli dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirilebilir. Her iki dönüştürücü çeşidinin prensip şeması Şekil 13'de verilmiştir.

Dönüştürücülerde ihtiyaç duyulan DC kaynak gücü, ya AC devreden doğrultularak yada ayrı bir akü-şarj devresinden alınır. Bu dönüştürücülerde yarı iletken anahtarlama elemanı olarak, BJT (Bipolar transistör), GTO (Gate Turn-off) ve son uygulamalarda IGBT (İzole kapılı bipolar transistör) kullanılmaktadır. Dengesiz olan sistemlerde, maksimum esneklik ve performans için her az başına ayrı ayrı dönüştürücülerin kullanılması uygundur.

Gerilim veya akım beslemeli dönüştürücü seçimi, fiyatına, distorsiyon kaynağına ve istenilen harmonik distorsiyonu düzeltme miktarına bağlıdır.



(a) Gerilim beslemeli dönüştürücü



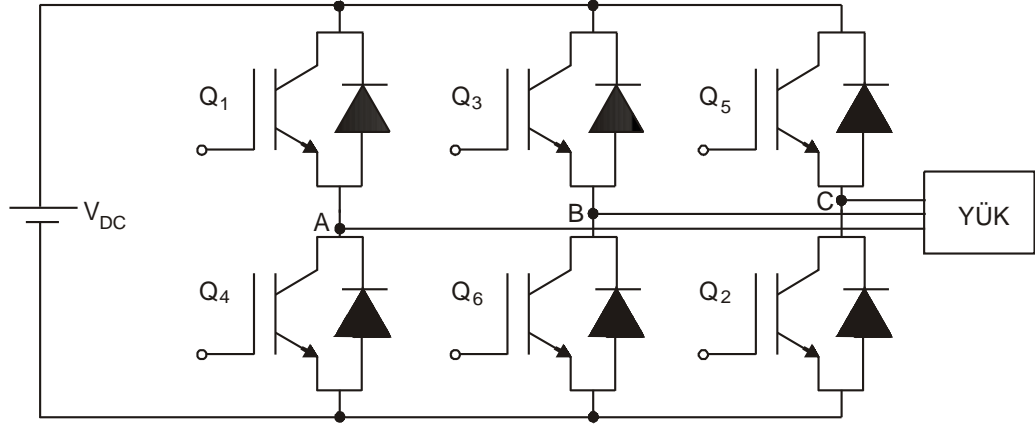
(b) Akım beslemeli dönüştürücü

Şekil V.13. Dönüştürücü Bloğunun Prensi Şeması [32]

V.5.3.1.a. Gerilim Beslemeli Dönüştürücü

Uygulamada en çok kullanılan dönüştürücü çeşididir. Bu dönüştürücüler paralel bağlanarak norm değerleri artırılabilir. Bunlarla yüksek frekansta anahtarlama yapmak mümkündür. Böylece inverterin gücünü arttırmadan yüksek dereceli harmonikleri elimine etmek mümkün olacaktır. Ayrıca bu dönüştürücüler akım beslemelilere göre daha ucuzdur ve daha az yer kaplarlar. En önemli dezavantajları kontrol sistemlerinin karmaşık olmasıdır. Özellikle, dönüştürücülerin paralel bağlanması gerektiğinde kontrol devresinin karmaşıklığı daha da artar. [32]

Gerilim beslemeli dönüştürücüler bütün sistem için kolaylıkla kullanılabilir. Üç fazlı PWM dönüştürücünün ana akım devresi Şekil V.14'de görülmektedir.



Şekil V.14. Gerilim Beslemeli Üç Fazlı PWM Dönüştürücünün Ana Akım Devresi [32]

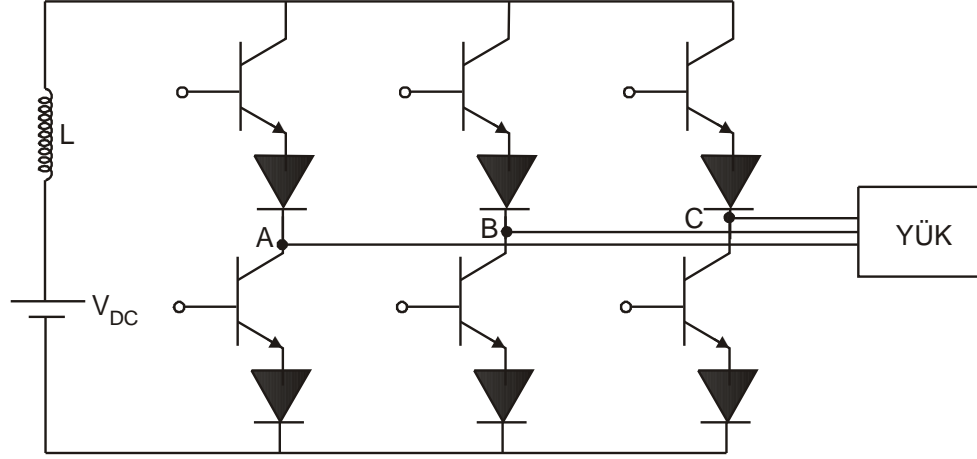
Q_1 iletme sokulduğunda A ucu, giriş geriliminin pozitif ucuna bağlanır. Q_4 ucunun iletme sokulması ile de negatif uç A ucuna bağlanır. PWM' de kullanılan IGBT'ler sürülme sırasına göre numaralandırılmıştır. Uygulamada IGBT yerine diğer anahtarlama elemanları da kullanılabilir (BJT, GTO vb.). Fakat PWM dönüştürücülerde yüksek anahtarlama hızları gerektiğinden, yüksek anahtarlama hızlarına sahip olmalarından dolayı IGBT kullanılması daha uygundur.

V.5.3.1.b. Akım Beslemeli Dönüştürücü

Akım beslemeli dönüştürücülerin yapısı daha basit ve daha güvenilirdir (kontrol devresi gerilim beslemeli dönüştürücülere göre daha basit olduğundan). Kayıplarının yüksek olması en önemli dezavantajlarıdır. Gerilim beslemeli dönüştürücüler bütün sistem için uygulanabilirken, akım beslemeli dönüştürücülerin bireysel yüklerle uygulanması daha uygundur (kayıplarının yüksek olmasından dolayı). Üç fazlı BJT' li akım beslemeli inverterin ana akım devresi Şekil V.15'de görülmektedir.

İnverter girişindeki AC kaynak ve büyük endüktanslı bobin seri bağlanarak bir akım kaynağı oluşturulmuştur. Belirli bir anda üst ve alt kollardan sadece birer BJT iletimdedir.

Akım beslemeli dönüştürücüde giriş akımı sınırlı ve kontrollü olduğundan, hatalı tetiklenmelere veya kısa devrelere neden olmaz. Ters akım diyoduna ihtiyaç kalmadan reaktif veya karşı gerilim üretme özelliği bulunan yükleri besleyebilir. Bunlara karşın pratikte kaynaklar sabit gerilimli oldukları için, akım kaynağı elde etmek için inverter girişinde büyük değerli bir bobine ihtiyaç vardır.



Şekil V.15. BJT'li Akım Beslemeli Dönüştürücünün Ana Akım Devresi [32]

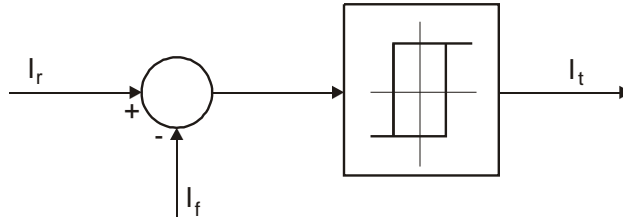
V.5.3.2 Akım Kontrol Devresi

Akım kontrol devresinin girişinde, harmonik belirleme bloğunda belirlenmiş referans filtre akım sinyalleri ve filtrenin çıkış akım sinyalleri (PWM generatörünün çıkış akım sinyali), çıkışında ise dönüştürücüyü tetikleme sinyalleri bulunur. Temel olarak çalışma prensibi, referans akım sinyalleri ile çıkış akım sinyalleri arasındaki fark işlenerek PWM generatörünün kapı sinyallerinin üretilmesidir.

Bir akım kontrol devresinden, hızlı akım kontrolü yapması ve anahtarlama sırasında oluşan harmonikleri bastırabilmesi özellikleri beklenir. Temel olarak iki farklı PWM akım kontrol metodu vardır. Bunlar; histerezis ve üçgen dalga metodudur. Son yıllarda DSP (Dijital sinyal işleme) teknolojisinin gelişmesiyle bunlara birde Dead-beat adı verilen bir yöntemde ilave edilmiştir. [32]

V.5.3.2.a. Histerezis Metodu

Bu kontrol metodu bir ölü bant veya referans akım etrafında histerezis eğriden yararlanılan kontrolden oluşur. Bu metodun prensip şeması Şekil V.16'da verilmiştir.



Şekil V.16. Histerezis Metodunun Prensip Şeması [32]

Burada;

I_r : Harmonik belirleme bloğunun ürettiği referans akım (A),

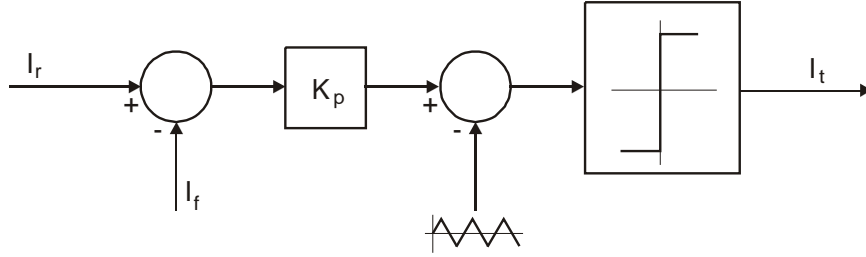
I_f : Aktif güç filtresi akımı (A),

I_t : PMW generatörünün tetikleme akımıdır (A).

Referans akım ile gerçek akım arasındaki hata akım sinyali ne zaman bandın dışarısına kayarsa tetikleme akımı banda geri döndürmeye zorlayacak şekilde açılır veya kapanır. Bu özellik akımı hızlı kontrol etmeyi mümkün kılar. En çok kullanılan metottur. Üçgen dalga metoduna göre daha az anahtarlama kaybı üretir. Anahtarlama frekansı, kayıplar ve düzeltme miktarı bant genişliğinden etkilenir. [32]

V.5.3.2.b. Üçgen Dalga Metodu

Gerçekleştirilmesi en kolay olan yöntemdir. Prensiş şeması Şekil V.17'de gösterilmiştir.



Şekil V.17. Üçgen Dalga Metodunun Prensiş Şeması [32]

Burada;

I_r : Harmonik belirleme bloğunun ürettiği referans akım (A),

I_f : Aktif güç filtresi akımı (A),

I_t : PWM generatörünün tetikleme akımıdır (A).

Şekilden de görüldüğü gibi K_p ile yükseltilmiş hata sinyalini taşıyıcı bir üçgen dalga ile karşılaştırma yoluyla PWM anahtarlama sırasını belirler. Böylece güç yarı iletken elemanlarının anahtarlama frekansı taşıyıcı bir üçgen dalganın frekansına eşittir. Çıkış sinyali PWM generatörüne uygulandığı zaman her bir taşıyıcı sinyal fazı sıralı olarak kaydırılır. Uygulanması basittir. En büyük dezavantajları, yüksek anahtarlama kayıpları ve yüksek frekanslı distorsiyonlardır. [32]

V.5.3.3 Harmonik Belirleme Ünitesi

Harmonik belirleme ünitesi aktif güç filtresinin en önemli kısmıdır. Yük akımındaki harmonikleri yok eden kompanzasyon akımını üretmek için genel olarak iki metot kullanılmaktadır. Bunlar; p-q teorisi olarak da bilinen ani reaktif güç metodu ve Fourier Seri (FFT) metodudur. [32]

Ani güç metodunda yük akımındaki her bir harmoniğin ayrı ayrı belirlenmesine ihtiyaç duyulmaz. Bu metot anlık çalışır ve o anda ölçülen akımı tam sinüs dalgasına tamamlayacak bir kompanzasyon akımının üreten hesaplama devrelerinden oluşur. Hesaplama için yük akımını ve kaynak gerilimini kullanır. Hesaplama için az sayıda bileşene ihtiyaç duyması ve bütün harmonik bileşenlerini kompanze etmesi bu metodun avantajları olarak sayılabilir. Ancak çoğu durumda bütün harmonik bileşenlerinin kompanze edilmesine gerek yoktur. Standartlarda belirtilen harmoniklerin yok edilmesi çoğunlukla yeterli olacaktır. Bu metotla harmonikler ayrı ayrı kontrol edilemez. [32]

FFT metodu, frekans domenin de düzeltme olarak da bilinir ve Fourier Analizi ile harmonikli dalga şeklinin periyodikliği prensibine dayanır. Bu metot örnek yük akımındaki FFT'nin performansı ile yükteki harmonik bileşenlerini ayrı ayrı belirler ve daha sonra aynı harmonik bileşenlerine sahip aynı genlikte fakat ters fazda bir akım dalgası üretir. FFT hesaplamalarında DSP (Dijital Sinyal İşleme) kullanılmazsa bu metot pratik olmaz. DSP kullanıldığı zaman bile kontrolün zaman cevabı anlık güç metoduna göre gözle görülür derecede uzun sürer. Bu yüzden FFT metodunu hızla değişen yükler için kullanmak optimum olmayacaktır. Bu metot ile istenilen harmonik mertebeli yok edilebilir. [32]

FFT metodu, uygulama zorluğu, cevap zamanının yüksek olması ve performansının düşük olması sebebi ile uygulamada pek kullanılmaz. Bu sebepten burada ani reaktif güç metodu ayrıntılı olarak anlatılacak ve MATLAB'de simülasyonu gerçekleştirilecektir.

Ani reaktif güç metodu ilk olarak 1983 yılında H. Akaigi tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem p-q teorisi olarak da bilinmektedir. Bu teori, üç fazlı nötr hatlı veya hatsız güç sistemlerinde anlık değerlere işlem yapan bir teoridir. Akım ve gerilim dalga şekilleri için hem kararlı hal hem de geçici rejimde geçerlidir. p-q teorisi $a-b-c$ koordinatlarındaki 3 fazlı akım ve gerilimlerin $a-b-0$

koordinatlarına cebirsel dönüşümünden oluşur. Bu $a-b$ bileşenlerden p-q ani güç bileşenleri hesaplanır. [32-37]

p-q teorisinin aktif filtre kontrolünde kullanılmasının bazı önemli sebepleri aşağıda sıralanmıştır;

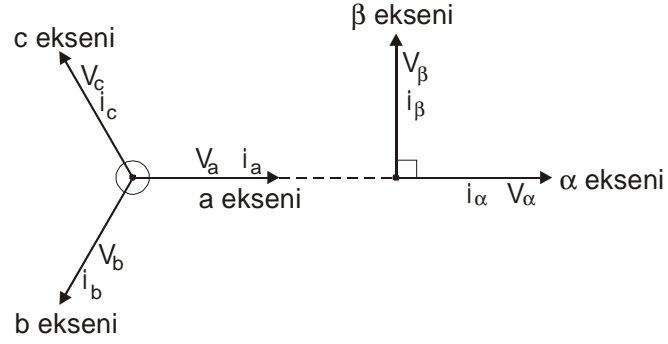
- ◆ Üç fazlı sistem teorisinin tabiatına uygun olan bir teoridir,
- ◆ Herhangi bir üç fazlı sisteme uygulanabilir (dengeli veya dengesiz, harmonikli veya harmoniksiz akım ve gerilime),
- ◆ Mükemmel dinamik cevap sağlayan anlık değerlere dayanır,
- ◆ Hesaplama devreleri basittir (sadece cebirsel tanımlar içerir ki bunların uygulanması standart işlemcilerle kolaylıkla sağlanabilir),

Üç fazlı sistemlerde matematiksel olarak ani akım ve gerilimler ile ilgilenmek için bu büyüklükleri vektör olarak tanımlamak uygun olmaktadır. Hesaplamaları basitleştirmek için üç faz akım ve gerilimler Şekil V.18'de ki gibi düşünülmektedir.

$a-b-c$ koordinatlarında, a, b ve c eksenleri aralarında 120° lik açı olacak şekilde aynı düzlemde yer alırlar. Ani uzay vektörleri V_a ve i_a , a eksenine yerleştirilirler ve bunların genlikleri ve $(+, -)$ yönleri zamana bağlı olarak değişir. Aynı şekilde V_b ve i_b , b eksenine, V_c ve i_c , c eksenine yerleştirilirler. Bu uzay vektörleri aşağıdaki gibi $a-b$ koordinatlarına dönüştürülebilirler. [32-37]

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{V.11})$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{V.12})$$



Şekil V.18. $a - b$ Dönüşümü [32]

Burada a ve b eksenleri birbirine dik koordinatlardır. V_a, i_a a eksenini, V_b, i_b b eksenini üzerindedirler. Bunların büyüklükleri ve $(+, -)$ yönleri zamana bağlı olarak değişir.

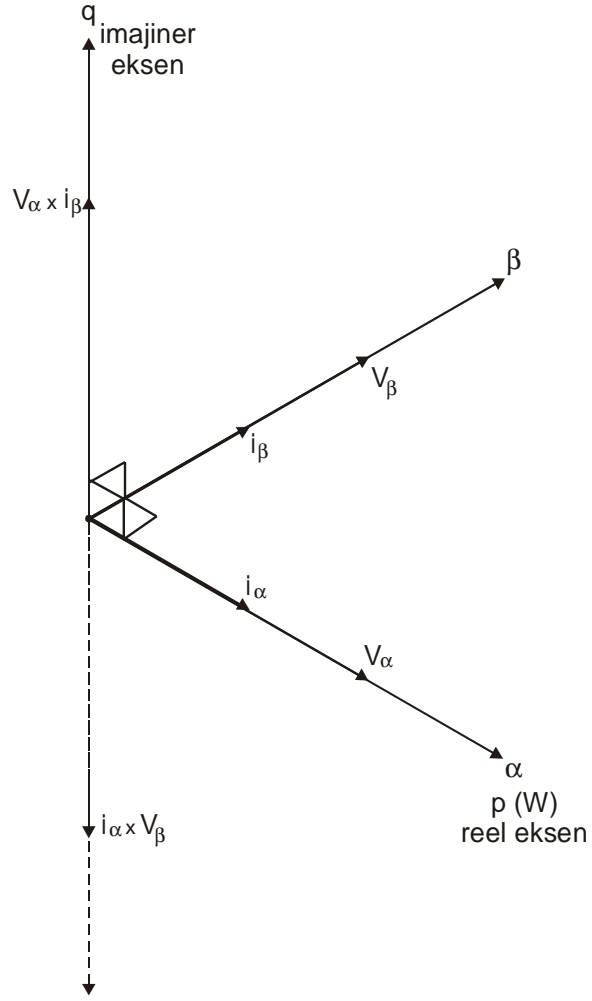
Şekil V.19'da $a - b$ koordinatları üzerinde anlık uzay vektörleri gösteriliyor. Üç fazlı sistemde geleneksel anlık güç,

$$p = V_a i_a + V_b i_b \quad (V.13)$$

olarak tanımlanabilir. Burada p bildiğimiz

$$p = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (V.14)$$

geleneksel denkleme eşittir.



Şekil V.19. Anlık Uzay Vektörleri [32]

Ani reaktif gücü tanımlamak için anlık imajiner uzay güç vektörü,

$$q = \vec{V}_a \vec{i}_b + \vec{V}_b \vec{i}_a \quad (\text{V.15})$$

şeklinde tanımlanır. Şekil V.19’da görüldüğü gibi bu uzay vektörü imajiner uzay vektörüdür ve $a - b$ koordinatlarında sağ el kaidesine uyacak şekilde gerçek eksene diktir. V_a ’nın i_a ’ya, V_b ’nin i_b ’ya paralel ve V_a ’nın i_b ’ya, V_b ’nin i_a ’ya dik olduğu göz önüne alındığında, geleneksel anlık güç (p) ve genliği q olan anlık imajiner güç (q),

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a & V_b \\ -V_b & V_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (\text{V.16})$$

gibi tanımlanabilir. Denklem V.16'da $V_a i_a$ ve $V_b i_b$ anlık gücü ifade ediyor. Çünkü bu terimler aynı eksendeki ani akım ve gerilimlerden oluşmaktadır. Bu yüzden p üç fazlı devrelerde gerçek güçtür ve birimi watt'dır. Ters olarak $V_a i_b$ ve $V_b i_a$ anlık gerçek güç değildir. Çünkü bir eksendeki gerilimle bu eksene dik diğer eksendeki akımın oluşturduğu güçtür. Bundan dolayı q geleneksel bir elektriksel bir büyüklük olarak düşünülemez. q için yeni bir büyüklük tanımlamak gerekir. Çünkü birimi watt, VA veya VAR değildir. [32-37]

V.5.3.3.a. Anlık Reaktif Gücün Fiziksel Anlamı

Denklem V.16'daki ifade,

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a & V_b \\ -V_b & V_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{V.17})$$

şekline dönüştürülebilir. $a - b$ koordinatlarındaki ani akımlar, i_a ve i_b iki çeşit ani akım bileşenine bölünebilir.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a & V_b \\ -V_b & V_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a & V_b \\ -V_b & V_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \end{bmatrix} \quad (\text{V.18})$$

Burada; a eksenini ani aktif akımı,

$$i_{ap} = \frac{V_a}{V_a^2 + V_b^2} p \quad (\text{V.19})$$

a eksenini reaktif aktif akımı,

$$i_{aq} = \frac{-V_b}{V_a^2 + V_b^2} q \quad (\text{V.20})$$

b eksenini ani aktif akımı,

$$i_{bp} = \frac{V_b}{V_a^2 + V_b^2} P \quad (\text{V.21})$$

b eksenini ani reaktif akımı,

$$i_{bq} = \frac{V_a}{V_a^2 + V_b^2} q \quad (\text{V.22})$$

olur. $a - b$ eksenlerindeki ani güçler sırasıyla p_a ve p_b olsun. Bunlar geleneksel olarak,

$$\begin{bmatrix} p_a \\ p_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a i_a \\ V_b i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a i_{ap} \\ V_b i_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a i_{aq} \\ V_b i_{bq} \end{bmatrix} \quad (\text{V.23})$$

şeklinde tanımlanabilir. Denklem V.19, V.20, V.21, V.22 ve V.23 kullanılarak üç fazlı devrede ani gerçek güç,

$$p = p_a + p_b = \frac{V_a^2}{V_a^2 + V_b^2} P + \frac{V_b^2}{V_a^2 + V_b^2} P + \frac{-V_a V_b}{V_a^2 + V_b^2} q + \frac{V_a V_b}{V_a^2 + V_b^2} q \quad (\text{V.24})$$

şeklinde verilebilir. Denklem V.24'deki 3. ve 4. terimlerin birbirini götürdüğü görülmektedir. Bu durumda Denklem V.24 sadeleştiğinde,

$$p = V_a i_{ap} + V_b i_{bp} = p_{ap} + p_{bp} \quad (\text{V.25})$$

elde edilir. Buradan; a eksenini ani aktif güç,

$$p_{ap} = \frac{V_a^2}{V_a^2 + V_b^2} P \quad (\text{V.26})$$

a eksenini ani reaktif güç,

$$p_{aq} = \frac{-V_a V_b}{V_a^2 + V_b^2} q \quad (\text{V.27})$$

b eksenini ani aktif gücü,

$$p_{bp} = \frac{V_b^2}{V_a^2 + V_b^2} p \quad (\text{V.28})$$

b eksenini ani reaktif gücü,

$$p_{bq} = \frac{V_a V_b}{V_a^2 + V_b^2} q \quad (\text{V.29})$$

olur. Denklem V.24, V.25, V.26, V.27, V.28 ve V.29'dan aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir;

- ◆ Ani güçlerin toplamı p_{ap} ve p_{bp} üç fazlı devrelerde ani gerçek güç ile çakışır. Bu yüzden p_{ap} ve p_{bp} ani aktif güçler olarak adlandırılır.
- ◆ Ani p_{aq} ve p_{bq} güçleri birbirlerini yok ederler ve kaynaktan yüke akan güce bir katkıları da yoktur. Bu yüzden p_{aq} ve p_{bq} ani reaktif güçler olarak adlandırılır. [32]

Üç fazlı devrelerde ani imajiner gücün fiziksel anlamı her bir fazdaki ani reaktif güç tanımından oldukça farklıdır.

V.5.3.3.b. Paralel Aktif Filtrelere Uygulanan p - q Teorisi

$a-b-c$ koordinatlarındaki üç fazlı, nötr hatlı bir sistemde gerilim ve akımların $a-b$ dik koordinatlarına dönüşümü,

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{V.30})$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{V.31})$$

şeklinde olmaktadır. H. Akaigi'ye göre ani gerçek ve imajiner güçler matris formda Denklem V.16'daki gibi,

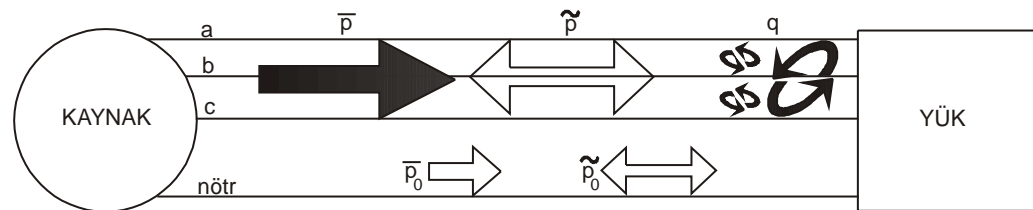
$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a & V_b \\ -V_b & V_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (\text{V.32})$$

şeklinde yazılabilir. Ani gerçek güç $p(t)$ ve imajiner güç $q(t)$ sabit DC ve değişken AC bileşen olmak üzere iki kısma ayrılabilir.

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{V.33})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{V.34})$$

Bu büyüklükler temsili olarak bir elektrik sistemi (üç fazlı ve nötr hatlı) için $a-b-c$ koordinatlarında Şekil V.20'de gösterilmiştir. [32-37]



Şekil V.20. $a-b-c$ Koordinatlarında $p-q$ Teorisinin Güç Bileşenleri [33]

Bu büyüklüklerin fiziksel anlamları aşağıda çıkarılmıştır;

\bar{p} : Ani gerçek gücün DC değeri. Kaynaktan yüke transfer edilen enerji. Yük akımının aktif temel bileşeni ile ilişkili güç.

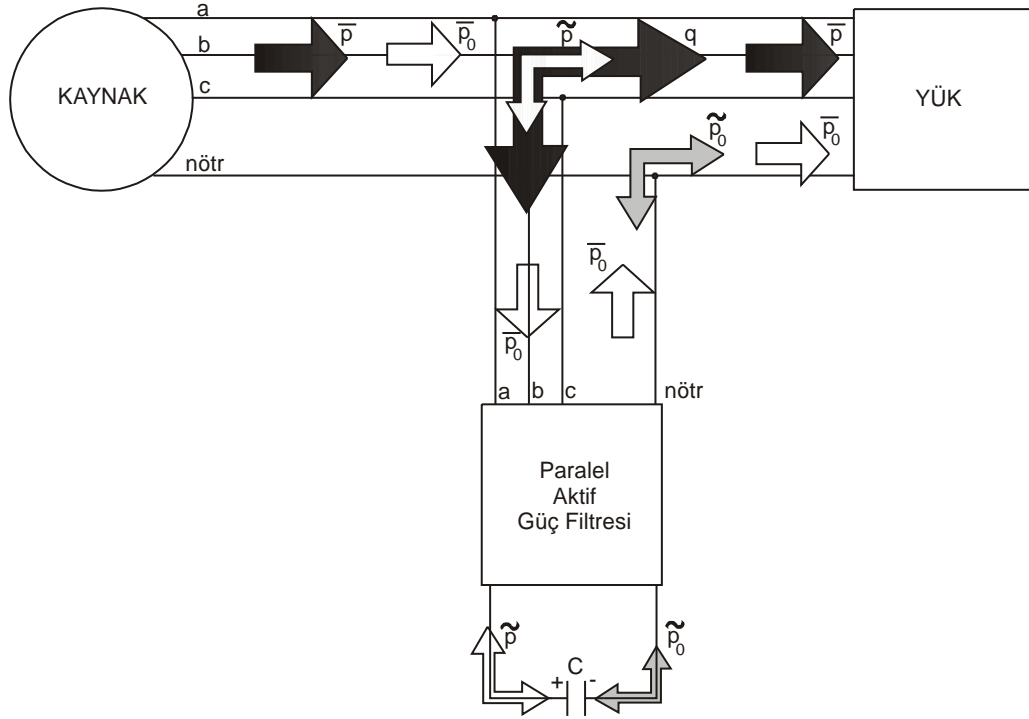
\tilde{p} : Ani gerçek gücün AC değeri. Kaynak ile yük arasında değiştirilen enerji. Yük akımının harmonikleri ile ilgili güç.

q : Ani imajiner güç. Yükün fazları arasında değiştirilen güç. Bu bileşenler kaynak ile yük arasında bir enerjinin transferi veya değiştirilmesini ifade etmez. Bu bileşen sistem fazları arasında dolaşan istenmeyen akımları ifade eder. Dengeli bir yük ve sinüsoidal bir kaynak olması durumunda harmonikli veya harmoniksiz durumda \bar{q} geleneksel reaktif güce eşittir. ($3V I_1 \sin j_1$). (\bar{q} : yük akımının temel bileşeni ile ilişkili reaktif güç. \tilde{q} : yük akımının harmonikleri ile ilişkili güç.)

\bar{p}_0 : Nötr hattının ani gücünün DC değeri. (yalnızca dengesiz sistemlerde oluşur). Kaynaktan yüke transfer edilen enerjidir.

\tilde{p}_0 : Nötr hattının ani gücünün AC değeri. (yalnızca dengesiz sistemlerde oluşur). Kaynak ile yük arasında değiştirilen enerjidir.

Şekil V.21'de $a-b-c$ koordinatlarında $p-q$ teorisinin güç bileşenlerinin paralel aktif güç filtresi ile kompanzasyonu görülmektedir. Burada hem harmonikleri hem de yükün çektiği reaktif gücü kompanze etmek istersek, sadece \bar{p} , $p-q$ teorisinin istenen güç bileşeni olacaktır. Diğer büyüklükler paralel aktif güç filtresi ile kompanze edilebilir. Sadece harmonikleri elimine etmek istiyorsak filtre ile \tilde{p} ve \tilde{q} güçlerini sağlamamız gerekir. \bar{p}_0 paralel aktif güç filtresindeki kaynaktan herhangi bir güç çekmeden kompanze edilebilir. Bu büyüklük kaynaktan yüke paralel aktif güç filtresi uçlarından ulaştırılır. Bunun anlamı akım ve gerilimin nötr bileşenleri kaynaktan yüke transfer edilen önceki enerji şimdi kaynak fazlarından dengeli bir yolla ulaştırılır. [32,33]



Şekil V.21. $a-b-c$ Koordinatlarında $p-q$ Teorisinin Güç Bileşenlerinin Paralel Aktif Güç Filtresi İle Kompanzasyonu [32,33]

Denklem V.32 ters çevrildiğinde,

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{V_a^2 + V_b^2} \begin{bmatrix} V_a & -V_b \\ V_b & V_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} - \bar{p}_o \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{V.35})$$

elde edilir. Nötr akımının kompanse edilmesi gerektiğinde sıfır koordinatındaki referans akımı kendisi olacaktır.

$$i_{c0}^* = i_0 \quad (\text{V.36})$$

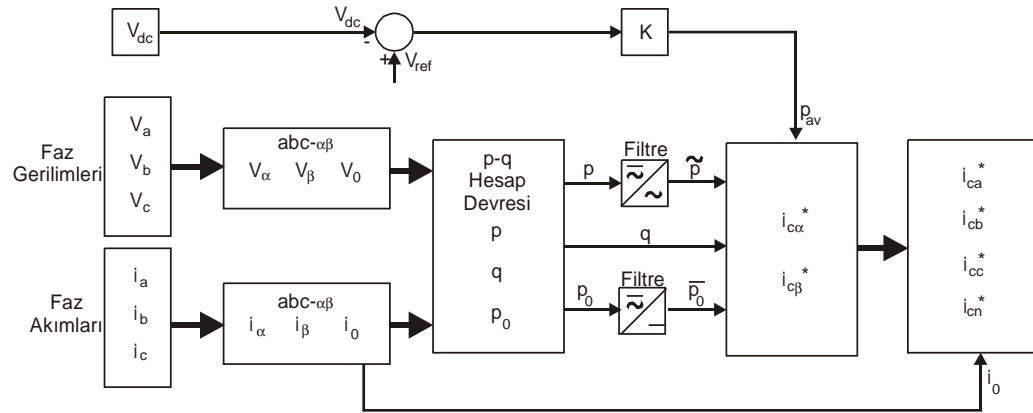
$a-b-c$ koordinatlarındaki referans akımlarını bulmak için Denklem V.31'deki ifadede dönüşüm yapılırsa,

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c0}^* \\ i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} \quad (\text{V.37})$$

$$i_{cn}^* = -(i_{ca}^* + i_{cb}^* + i_{cc}^*) \quad (\text{V.38})$$

referans filtre akımları elde edilir.

Bu sistemin üç fazlı, nötr hatsız sistem için kontrol blok şeması Şekil V.22’de verilmiştir. p ve q güçlerinin sabit ve değişken kısımlarını ayırmak için bir alçak geçiren filtre kullanılmıştır.



Şekil V.22. $p - q$ Teorisi Uygulanmış Bir Paralel Aktif Filtre İçin Kontrol Blok Şeması [32,33]

V.5.3.4 Paralel Aktif Güç Filtresinin Çıkışına Bağlanan Endüktans

Dönüştürücü çıkışındaki endüktans, kaynak uçlarındaki gerilim ile filtre tarafından üretilen PWM gerilimi arasında bir tampon görevi görür. Filtre performansı için bu endüktansın değeri çok önemlidir. Eğer küçük değerli bir endüktans kullanılırsa büyük anahtarlama harmonikleri kaynak akımına ilave edilmiş olur. Büyük değerli bir endüktans kullanıldığında ise filtre akımının hızlı değişimleri algılanamayacak ve istenen kompanze akımı sağlanamayacaktır.

Bu endüktans, dönüştürücü tarafından üretilen gerilim sinyallerini, harmonikleri kesmek için akım sinyallerine dönüştüren bir elemandır. [32]