UDK: 62U.011.1

Simetrili Bileşenler

Nihat TAVLAN
TEK

ÖZET

Simetrili bileşenler hakkında yazılmış eserleri iki gurupta toplamak mümkündür. Bunlardan birincisi konuya ait teorik kitaplardır ki, genel denklemleri ve diğer 'kuralları teorik yollardan çıkardığı için titiz ve yorucu bir çalışma ister-ler. Diğer gurup ise kısa devre veya röle kitaplarının ihtiva ettiği sadece kendi konularının ihtiyacına cevap yerecek nitelikte yazılmış bölümlerdir, bunları da bütün durumlara uygulamak imkansız olmaktadır.

SUMMARY

it is possible to gather literatüre about symmetrical components in two groups. Former group is the theoretical books which drive general -formulas and rules theoretically which is a tiring work. Later group includes the short circuit and relay subjects whichare forneedsof theirown subjects. Theseare not applicablefor general cases. in this article general formulas are driven in a simple and original way which can be easily remembered. Examples are chosen such that symmetrical components can be applied to the general cases.

GENEL

Bilindiği gibi kısa devre ve topraklama hesaplarında, teçhizat seçiminde veya röle ayarlamalarında anza anında geçecek akınıı hesaplamak gerekir. Simetrik şebekelerde tek kutuplu eş değer devre üzerinden yapılabilen bu hesaplar oldukça kolaydır. Şebekenin simetrik durum arz etmediği durumlarda örneğin tek fazlı ve çift fazlı kısa devrelerde, hat kopmalarında veya anormal dengesiz yüklemelerde trifaze şebekeyi tek fazlı şebekeye indirgemek mümkün değildir. Bu durumda üç fazlı şebeke üzerinden hesaplan yapmak çok zor olmaktadır. Bu güçlüğü ortadan kaldırmak için simetrik olmayan şebekeyi simetrik şebekelere ayırmak ve elde edilen her bir simetrik şebekeyi tek fazlı eşdeğer devreye indirgeyerek akım ve gerilimleri hesaplamak mümkün olabilir.

Simetrik olmayan bir şebekeyi simetrik devrelere dönüştürebilmek için Fortescue (1918) tarafından bulunan Simetrili bileşenler veya bayan E. Clarke (1937) tarafından geliştirilen «• ^8, O (diyagonal bileşenler) bileşenlerinden faydalanılmaktadır.

Kısa devre hesaplarını veren kitaplarda veya Röle kitaplarında simetrili bileşenler konusu kısaca anlatılmakta ve birkaç tipik kısa devre örneği verilmektedir. Bu durumda teknikte çalışan mühendisler değişik durumlarda simetrili bileşenleri tatbikte güçlük çekmektedirler. Tamamen simetrili bileşenleri konu alan kitaplarda ise genel denklemlerin çıkarılışı esnasında Siklik simetrik devrelerde asli (Z_n, Z^, Z_M) ve kuplaj empedanslarmdan (Z_{12}, Z_{13}, *2%* v.s.) hesap yapılmaktadır. Bu da zaman zaman bu konuya baş vurmak ihtiyacım duyan projecilere her defasında yeni baştan teoriye girme zorunluğu doğurmaktadır. Zaman alıcı ve yorucu olan bu yoldan kaçınmak için tahmini neticeler veren pratik hesap yöntemleri tercih edilmektedir.

Bu bölümde simetrili bileşenler, teoriye girmeden fakat karşılaşılabilecek her türlü hale tatbik edilebilecek şekilde verilmek istenmiş ve aynı zamanda tipik örneklerle zenginleştirilmiştir. Diğer a, *p,* O bileşenleri de oldukça enteresan bir konu olmasına rağmen teknikte daha az bir uygulama alanı bulması ve yazının hacmini büyütmemek için buraya alınmamıştır. Simetrili bileşenlere girmeden evvel üç **fazlı** simetrik alternatif akım şebekesine kısaca bir göz atmak gerekir.

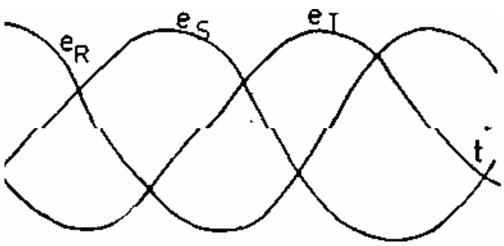
A. SİMETRİK ÜÇ FAZLI ALTERNATiF AKIM ŞEBEKESi

Eğer faz gerilimleri eşit effektif değerler arasında 120° faz kayması varsa, bu gerilimler simetrik bir sistem teşkil ederler. Zaman ekseninin sıfır noktasında e^ gerilimi maksimum değerinde ise, buna göre e_R, e_s, *e^* gerilimleri:

e_R = E Coş wt

e_s = E Coş (wt — 120°) (1)

e_T = E Coş (wt — 240°)



Şekil, l

Şekil 1 gerilimlerin zamana göre değişimini göstermektedir. Bu gerilimler vektöriyel olarak gösterilmek istenirse :

= E

T
3 (2)

E_s = E . e

E_T = E . e 3

Burada e = e

olduğundan E_T için: -

E_T = E . e 3 (2a)

yazılabilir. Denklemlerde basitlik sağlamak için

J~~3
e = a konmaktadır. Burada a birim vektörü Euler denklemine göre:

J'~7~~ 1 V~3
a = e = -----— + j —- şeklinde yazılabilir

ve aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

a^2 =e ° = e 1 . V3
- — ~ J -y-

a^3 = e = 1; a^4 = a; a^5 = a^2

1 + a + a^2 = O

a + a^2 = — 1 ; a — a^2 = JV^3

1 + **a** = — a^j =— + ***j*** *~;* 1 + a^2 = — a

- a = j V3 a^2 = - -- j ; 1 - a^2

— j V3 a =~-+ J V~3

1 — a + a^2 = —2 a ; 1 + a — a^2 = —$2a^2$ 1

— a — a^2 = 2 ; (1 + a) (1 + a^2) = 1

1 — a 1
— *a?* = — a ; $(1 + a)^1$ = a

gerilimler için:

E_R = E E_s =

a^2 E E_T = a

E

yazabiliriz. Gerilimlerin bu sırasına normal sıra veya «direkt sistem» denilmektedir. Denklemlerde, 120° ile. 240° nin veya aynı şey demek oljan; &• ile *af* nin yerleri değiştirilirse gerilimlerin sırası değişmiş olur; böylece «ters sistem» elde edilir. Fazlar arası gerilimler için:

$U_{SR} = E_s - E_R = E$ (a2- 1) = j V3". a . E (4)

Aynı şekilde:

U_{TS} = j . V3 . E

(4a)

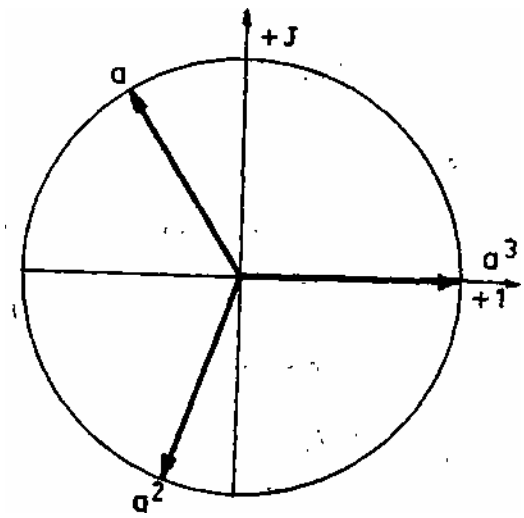
U_{RT} = j . . E

$U_T — Z I_T = O$

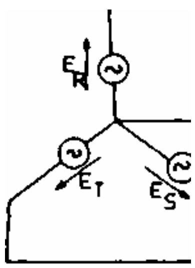
$E_R + E_s + ET \quad = O$

Bu denklemlerden:

$O = Z (I_R + I_s + I_T) = - Z I_0$



Şekil. 2



I1

Şekil. 3

Şimdi simetrik bir şebekede akımları tespit edelim. Simetrik bir şebekede her fazdaki empedanslar Z aynı değerde olacaktır. Şekil *3* den:

$^J o + !R + !_S + ÎT = °$

$U_R - Z I_R = O$

$U_s - Z I_s = O$

Bu demektir ki, nötür iletkeninden akım geçme, yecektir. Nötr iletkenini tamamen kaldırmak veya buna bir Z_0 empedansı ilave etmek hiç bir şeyi değiştirmeyecektir. Akımların hesabı için:

$^{IR} \sim Z \; ' \, ^{Is} \sim Z \; ' \, ^{IT} - Z$

formülleri kullanılır.

Gerilimlerin simetrik olmasından

yazılabilir. Burada -=- = I olduğu için:

$I_s = a^2 I$ (5)

$I_T = a I$

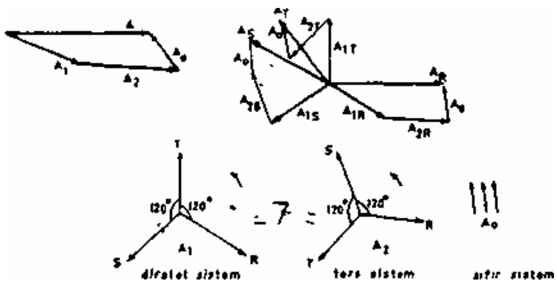
Bu denklemlerden görüleceği üzere tam bir simetrik şebekede hesap yapmak için, Ibir fazda hesap yapmak kafidir. Diğer tadardaki" akTinları elde etmek için bulunan değeri a^2 ve a ile çarpmak yetecektir. . . - ; ,
-- , ^

B. SİMETRİLİ BİLEŞENLER

/ _.' r '. -- -

Her hangi bir A vektörü, yine her hangi üç (A,, A_2, A^ vektörün toplamı olarak düşünülebilir. (Şekil-4).' Bu üç vektör istenilen büyüklükte ve istenilen fazda olabilir.

Şiindi büyüklük ve fazlan farklı plan ($Â_R$, A_s, A_T)" üç vektör alınırsa, bunların her biri.de üç bileşke vektörün toplamı olarak düşünülebilir. Bileşke vektörler istenildiği büyüklük ve fazda alınabileceğine göre; A_R, $A_{s>}$ A_T vektörlerinin birinci bileşke vektörleri her üçü için aynı büyüklükte, bir birinden 120° faz açılı (normal dönme yönünde) simetrik bir sistem olarak alınabilir. Buna direkt sistem denir, ikinci bileşke vektörü ise yine eşit büyüklüklerde ve yine 120° faz farklı fakat ters dönme yönünde üç simetrik vektör olarak alınabilir. Bu sisteme de Ters sistem adı verilir. Üçüncü- bileşkeler de aynı fazla aynı büyüklükte simetrik sistem olarak alınabilir. Bu da sıfır sistemi teşkil eder.



Şekil. 4

Simetrik olmayan üç fazh sistemde her bir faz vektörünün bileşenleri:

$$Ağ = A_{ls} + A_{2S} + A_{,,} \qquad (6)$$

$$Aj = A_{JT} + A_{2T} + A_0$$

Burada R fazı referans fazı olarak alınırsa :

A_R =

A_s = a' A_{1R} + a AJR -f A,, A_T = a A_m + a* (7)

AJR + A_0

Yukarki denklemlerden bu defa üç fazlı simetrik olmayan sisteme ait simetrili bileşenler hesaplanabilir :

AO— —r- (A_R + Ağ + A_T)

AIR = -r- (A_R + aA_s + a* (8)

AJR = — (A_R + az AS + a AT)

Yukanda belirtilen yöntem yardımı ile her simetrik olmayan üç fazh sistem, üç simetrik sisteme ayrılabilir. Bundan sonra da hesaplar tek fazlı olarak yürütülerek oldukça kolaylık sağlanmış olur.

Bundan sonra denklemlerin yazılışında basitlik ve genellik sağlamak için referans kabul edilen faz gerekmedikçe, yazılmayacaktır. O halde mesela R fazına indirgenen simetrili bileşenlen için $A_{,R}$, *A^, A_0* yerine doğrudan doğruya A], Aj, A^ yazılacaktır.

Yukanda belirtilen yol uygulanarak üç fazh simetrik olmayan bir alternatif akım sisteminde akım, gerilim ve empedans denklemleri kolayca çıkarılabilir. Bundan böyle dengesiz (simetrik olmayan) besleme gerilimleri için E, empedanslar üzerindeki gerilim düşümleri için U ve anza noktasındaki gerilimler için V harfleri kullanılacak ve hepsi faz-nötür gerilimini belirtecektir.

Akımlar:

I_R = Io + I, + I,

I_s = !„ + *a?* I, + a Ij

I_T = I_0 + a Ij + *a?* I_2

= — da + I_s + IT)

= -" (!R + ^{a} + I_T) (8a)

Gerilimler (Şebekenin herhangi bir noktasında)

VR = Vo + V, + V,

V_s = V_0 + a2 V, + aV_2

V_T = V_0 + a V, + a»V_2

V_0 = -f (V* + Vs + VT)

$^v1$ = -J^1 (V_R + aV_s + a'V_T) (8b)

1

V_2 = -- (V_R + a'V_s + aV_T)

Empedanslar :

Z_R = Z,, + Z, + Z,

Z_s = Z,, + *a?* Z, + az»,

ZT = Zj + aZj + a^2Zj

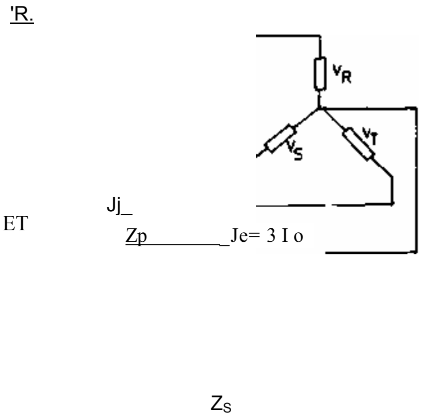
Zo = - C^2* + Zs + ZT

^{r}-ι = -r- (Z_R + aZ_s + a^2Zr) (8c)

= — (Z_R + a*Z_s + a Z,)

C. GENEL DENKLEMLER

Şebeke; en genel hali ile besleme gerilimleri E, faz empedanslart Z ve şebekenin hesap yapılacak noktasındaki V gerilimleri simetrik olmıyan bir şebeke olsun. Dolayısıyla akımlar da simetrik değildir.



Şekil. *5*

Yalnız şebeke siklik simetrik olsun; yani her bir faz empadansına diğer fazların tesiri aynı olsun. Zaten teknikte karşılaşılan sadece siklik simetrik şebekelerdir. Bu durumda ge^j nel denklemleri elde edebilmek için orijinal bir yol olarak her fazın nötür hatı ile teşkil ettiği devrede gerilim düşümlerini yazalım :

$V_R + z, 3 I_0$

$E_s = Z_s I_s + V_s$ $3 I$ (9)

$E_T = Z_T I_T + V_T$

Şimdi $3 E_0 = (E_R$ -f $E_s + E_T)$ olduğuna göre:

$3 E_0 = Z_R I_R + Z_S I_S$ $3 z, 3 I_0 + V_R$

$V_S + V_T$

$= Z_R (!,, + I, + I_2)$

$+ Z_s (I_0 + a^* î. + aI_2) + Z_T (I_0 + al, + a'Ij) + 3z,, 3I_0 + 3V$

$(^Z R$

$I, + (Z_R + aZ_s + a2Z_T)$ ^ + $Sz,, 31,,$ $+ 3V$

$3Z,I_2$ $3 I_0 + 3V_0$

$E_0 = Z_2 I_1 + Z,I_2 +$ $(Z,,$

Aynı şekilde $3 E, = (E_R + a E_s + a^*E_T)$ eşitliğinde (9) denklemlerini korsak ve $a^3 = 1$, $a^4 = a$, $(1 + a + a^2 = 0)$ bağıntılarını göz önüne alırsak :

$3 E, = ZRI_R + a Z_S I_S + a^* Z\text{^} + 23\ 3I_0 + az, 3 I_0 + a^l$ zj, 3 !<, $+ V_R + aV_s + a^*V_T$

$= Z_R (I_0 + I, + I_2) + Z_s (aI_0 + a^* I, a2I_2) + ZT (a^* I, + a' I, + a^*I_2) + 3V,$

$= (^Z R + aZ_s + a^2 Z_T)$ Io $+ (Z_R + Z_s + Z_T)$ Ij $+ (ZR$ -l- $a'Z_s + aZ\text{^} I_2 + 3V,$

$= 3 Z, I_0 + 3 Z_0 I, + 3 Z\text{^} I_2 + 3 V_t E,$

$= Z,,!, + Z,I_2 + Z,!,, +V,$ elde

edilir.

Aynı yoldan gidilerek E/ye ait denklem de elde edilir. Sonuç olarak genel denklemler:

$E, = Z, I, + Z,I_2 + Z,!,, + V,$

$E_2 = Z, I, + ZoI_2 + Z_1 I_0 + V_2$ (10)

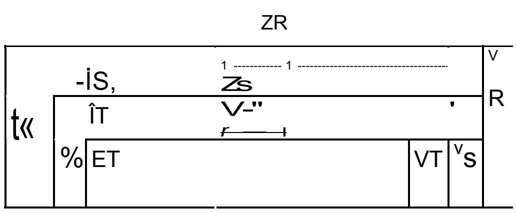
$E_0 = Zjlj + Z\text{^} + (\text{^} + 3zo)\ !,,$ -f V_0

şeklinde yazılabilir.

Simetrik olmıyan bütün durumlara ait problemler bu denklemler yardımı ile çözülebilir. Ezberlemesi güç olan bu denklemleri istenildiği vakit rahatça yazabilmek için ilk Ej denklemine ait I_i akımının çarpanı olan empedansın Z,, olduğunu akılda tutmak yeterlidir, bundan sonra I,, I_2 ve I_0 akımlarının çarpanları olan empedanslar dairesel bir permütasyon teşkil ederler. Buna göre bir daire üzerine sıra ile Z_t Z, ZQ yazılırsa; empedanslar Z,, Z, Z_2, Zj Zg $Z_{1(}$ Z_t Zj Zg olarak dairesel bir sıra takip ederler.

D. ÖZEL HALLER

Ekseri kısa devre problemlerinde arıza noktasına eşdeğer akım kaynaklan yerleştirildiği ve bu kaynakların şebekeyi arıza esnasında simetrik duruma getirecek gerilimler ürettiği kabul edilir. O halde bu kaynakların ürettiği gerilimler o noktada arızadan dolayı husule gelen gerilimlerin simetrili bileşenleridir. Buna göre arıza noktası gerilim simetrili bileşenlerini hesaplayalım ve önce nötür iletkeninde bir empedans olmadığını ve diğer empedanslann siklik simetrik bir sistem teşkil ettiklerini kabul edelim.



Şekil. 6

Bu bağıntılar dış ve iç empedanslardan gidilerek çıkanlmaktadır. Bu nedenle burada daha basit ve orijinal bir yöntem uygulandı. Gerilim düşümü denklemlerinden :

$V_s = E_s - Z_s I_s$ (11) denklemleri elde edilir.

$V_T = E_T$ — ZT Değerlerin simetrili bileşenleri yazılırsa :

$V\ V_2 = E_0 + E, + E,$ -

$V_0 + a^2!,$ $a V_2 = E_0$ aE_2
$V_0 + a V, + Z_s$
$al, + a^2 I_2)$
$— (I_0 + _2 - E_0 + aE, +$

$a^2 E_2 - (I,, +$

önce her üç denklemi de toplar ve l -t- a + a^2 = O eşitliğinden yararlanırsak:

3 V = S E -

= ,3E_0 V_0 = E_0 -

Z,,I_0

çıkar. Bundan sonra ikinci denklemi a ve üçüncü denklemi a^2 çarpıp, her üçünü toplar ve a3 =1, a^4 = a, a' = a^2, a^6 = 1 bağıntıları gözönüne alırsak:

V — F _ 7 T
Vj — JJj - *,, I,

elde edilir. Ayni şekilde bu defa ikinci denklemi a^1 ve üçüncü denklemi a ile çarpıp, her üçünü toplarsak :

$V_2 = E_2 - Z_2 I_2$ '

elde edilir. Bu denklemler toplu bir halde :

V, =» E, — Z, I, . • •

V.'E.-Z,!, (12)

şeklinde yazılır.

Burada Z,, Zj, Z,, empedanslan şebekenin arıza noktasından görülen toplam empedanslann simetrili bileşenleridir. Nötr iletkeninde ZQ empedansı varsa :

V, = E, - Z, I,

$V_2 = E_2 - Z, I_2$ (13)

$V_0 = E_0$ - (Z,, + 3Z,,) !«,

olur. Besleme gerilimleri simetrik ise (E_l = E E, = O, E,, = 0) :

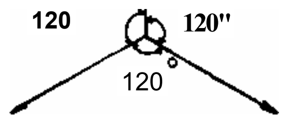
V,'= E - Z, I»

$V_2 = - Z_2 I_2$ (14)

$V_0 = - Z,, I_0$

olacaktır.f Diğer bir özel durum da şebekede notür Hattı yoksa (10) riumarah genel denklemlerde ve diğerlerinde I_0 = O ve ^ = O koymak gerekir.

Simetrili bileşenlerle hesap yapılırken dikkat edilecek en önemli nokta problemin veriliş şekline göre başlangıç koşullarım doğru seçmektir. Başlangıç koşullan doğru ve eksiksiz seçilirse geriye bunları uygun formüllere uygulamak ve birkaç matematik işlem kalır.



Şekil. 7

Şimdi birkaç tipik örnek verelim :

1. Faz simetrisine haiz, yani aralarında 120° açı olan fakat genlikleri farklı olan üç akım vektöründe simetrili bileşenler ve bu akımları veren simetrisiz üretecin beslediği simetrik empedanslı şebekede gerilim değerleri bilinmek istensin. I_R birim vektör kabul edilirse I_s vektörü I_R'in a katı, I_T ise 3 katı olacaktır. Burada ot ve £ katsayıları sıfırdan küçük veya büyük olabilir. Buna göre :

IR = IR. $I_s = ^{a2}$ a IR- I_T = a p I_R

Şimdi 8a denklemlerinden :

+ I_T) = -- (1 +

a + a?p);i_R-= -y (1 + a + p) I_R

$!_2$ = "-yUk + a^2 I_s + aI_T) = - (1 +'a* a

+ a^2 3) I_R = — (1 + a a + a^2 3) I_R

ro = -T-d_R + Is + IT) =-r- d + a^2 tt + a 3)

Bu denklemlerde a = — — + j— ve a^2

-- - -- j j- korsak :

I, = -y ü + a + 3>

olur. a = *2,* 3 = *2* olsun, yani I_s ve I_T akımları I_R akımının iki misli olsun :

—

olacaktır. Empedanslar simetrik olduğu için (8c) denklemlerinden Z„ = Z, Z, = O ve Zj = O olacaktır. Bunları (10) denklemlerine koyarak istenene şebeke V_R, V_s ve V_T gerilimlerini bulalım :

! = Z I_R + V,

= - -J Z IR + V_0

E_R = (E_0 + E, + E,) = Z I_R - ~ Z I_R -f

V, + V_2 + V_0 = Z I_R + V_R

E_s = (E_0 + a^2 E, + a Ej) = —Z (-1+5

a^2 — a) I_R + a^2 V, + a V_2 + V_0 = 2a^2 Z I_R + V_s

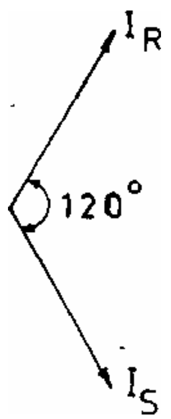
E_T = (E_0 + a Ej + a^2 Ej) = -j- Z (- l + 5 a

— a^2) I_R + aV, + a^2 V_2 + V_0 = 2a Z I_R + V_T

Verilen akımların simetrik empedanslar üzerinde meydana getirdikleri gerilim düşümlerinin fiziksel anlamlan neticeleri doğrulamaktadır. Sonuçlardaki a^2 ve a terimleri akımlar arasındaki 120° faz farkından ileri gelmektedir.

2. Üç akün vektöründen biri sıfır, diğer ikisi eşit büyüklükte ve aralarındaki açı 120° olsun; buna göre bir önceki örnekteki sonuçlara varılmak istensin.

$I_R = I_R$, $I_s = a^2 I_R$, I_T = O



Şekil. 8

(8a) denklemlerinden:

I» = —(!R + Is + ÎT) = -*f* d + a») I_R =

I, = -j- (!R + a I_s + a^2 I_T) = — d + a»)

I_2 = -j (IR + a2 Is +

1 a-

I_R = -y d + a) I_R = — -

- I_R

denklemleri elde edilir.

Bu akımları veren üretecin beslediği şebeke empedanslan simetrik olsun (Z_0 = Z, Zj = O, Z_2 = 0) ve (10) denklemlerinden:

E_t = Z I, + V_t = -y Z I_R + V_t E_2

= Z I_2 + V_2 = - 4 Z I_R + V_2

E_0 = Z I, + V_0 = - — Z I_R + V_0

$E_R = (E» + E, + Ej) =$ —- Z (- a + 2 - a^2) IR + V_R = Z I_R + V_R

1

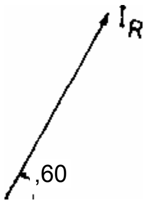
$E_s = (E_0$ + az E, + a EJ = — Z (—a + 2 a2 _ 1) $I_R + V_s$ = a* Z $I_R + V_s$

E_T = (E,, + a Ej + az E_2) = —Z (— a + 2 a - a) $I_R + V_T = V_T$ sonuçlan çıkar.

3. Okuyucu şekilde verilen iki özel duruma ait yukarda istenen sonuçlan eksersiz olarak çıkarabilir.

a) $I_R = I_s$, I_T = O, I_R ve I_s arasındaki açı 60°

b) $I_R = I_s$, I_T = O, I_R ve I_s arasındaki açı 180°



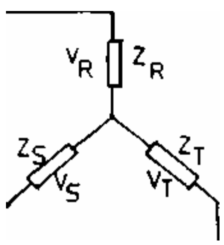
Seldi. 9

4. Pratikte sık sık raslanan, bir asenkron motorun iki faza kaldığı, yani sigortalardan birinin her hangi bir sebeple eriyip motorun iki faz ile beslendiği durumda gerilim değeri ve çektiği akım hesaplanmak istensin.

____LR = 0

K

Ι',



Şekli. 10

Besleme gerilimleri E simetrik olsun. Genellikle asenkron motorlarda nötr hattı yoktur. Buna göre başlangıç koşullan

I_R = O, $I_s = - I_T$, $V_T = V_s$, I_0 = O, = 0

Burada $V_s = V_T$ ve I_s = — I_T eşitliklerinden (8a), (8b) denklemleri yardımıyle :

V, = V_2 ve I, = r Ij

elde edilir. Aynca $V_R = V_0$ + V, + V_2 = O eşitliğinden V_0 = — 2 V_t çıkanlabilir. Şimdi genel denklem (10) a göre:

E = Z_2 I_2 + V_I O = Z, I,

+ V, O = Z_2 I, + Z, I_2 —

2 V,

Bu denklem lerdeki bilinmeyen $I_{1(}$ I_2 ve Vj elde edilebilir :

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2}, \quad I_2 = -\frac{E_1}{Z_1 + Z_2},$$

$$V_1 = - E \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Buradan faz akım ve gerilimleri :

I_s = j + a L, = (a* — a) I, = — j V3 E

olur. Halbuki arızasız durumda V3 E akımı

I_s = çekmekte idi.

$V_s = V_0$ + a* V, + a V_2 = - 2 V_I + # V, + a V, = — 3 V_t = E. 3 Z,

anzasız halde V_s = E idi.

5. Simetrik gerilimlerle beslenen bir şebekede tek fazlı bir kısa devre olsun ve nötür iletkeninde z,, empedansı mevcut olsun, kısa devre noktasındaki akım ve gerilimler tespit edilmek istensin.

Verilenlere göre:

V_R = 0, $I_s = I_T$ = O, $I_R = I_n$

Buna göre:

3 Ij = $I_R + I_s + I_T$ = IR

$3\ I, = I_R + a\ I_s\ 4\text{-}\ a^*\ I_T = I_R\ 3$
$L, = I_R + az\ I_s + a\ I_T = I_R$

IR

-cm

-U.ZT

Zo

Şekil. 11

Şimdi (14) denklemleri:

$V, = E - Z, I,$
$V, = - Z, I,$
$V_0 = - (Z,, + 3zj,)\ I,$

Bu eşitlikleri aşağıdaki denkleme korsak:

$V_R = V_0 + V, + V_2 = E - Z, I, - Z, I,$

$(Z_0 +\text{-}3 \wedge I, = O$

$$1 \sim \frac{E}{Z, + Zj + (Z,, + 32o)}$$

$$\text{-}" \quad K \quad \frac{3\ E}{Z, + Z, + (Z,, +}$$

Gerilim değerlerini bulmak için:

$$_t = E — Z, I_t = E \frac{Zz + (Z, +}{Z, + Zj +(Z,, +}$$

V_2 — — 7,2 Ij _— _c,F

+$(Z_0$

V. . V. V, .

$V_s = j\ V3 \bullet E^4$,- _ a (Z, +
32o) - Z,

Veya a = — — + j — ile hesap yapılarak,

$$s \sim \frac{V3}{*} \quad \frac{V3\ (Zp + 3zp) + j\ [2\ Zz + (Z_0 +}{Z, + Zz + (Zo +}$$ elde edilir.

Aynı şekilde bu defa $V_T = V_0 + a\ Vj + a^2\ V_2$ eşitliğinden giderek :

V - - i
V_T_ j

veya :

değerleri elde edilir.

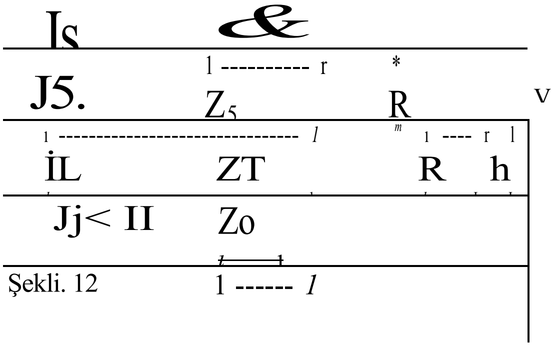
$$V_T = —i\text{-}\ E \frac{V3\ p}{Z} \quad \frac{'\ yT(Z_0 + 3zp) - j\ [2\ Z_2 + (Zp +}{Zj + Zj + (Z}$$

$I_R = 0, \quad V_s = V_T = O, \quad I_s +$ = — I Kil

6. Son bir örnek olarak yine simetrik gerilimlerle beslenen bir şebekede iki fazlı bir toprak kısa devresi olsun. En genel hale ait değerleri elde etmek için kısa devre noktasında R arıza direnci ve nötür devresinde *Zg* em pedansı mevcut olsun. Verilenlere göre:

Buna göre :

$I_0 = - (I, + I_2)$



Şekli. 12

Bu değerleri (14)
sak :

C ("7 ı
j — £. ^Aj -f-

$V_, = - (Z, + R$
$V, = (Z_0 + R +$

Bu üç denklemde
de edilir :

$(Z, + R)\ (Zj + R) + [(Z, + R) + (Z_2 + R)]\ (Z_0 + R +$

2 — — $(Z, + R)\ (Z_2 + R) + [(Z, + R) +$

T. _ p. ---------- $(Zj + R) + (Z_0 + R$ •f 3zo)

+ R)] $(Z_0$ R + 3 z,,)

$(Zo + R)\ (Z, + R + 3\ ZQ)$

V, = E

$(Z; + R)\ (Z_2$ -f $R) + [(Zj + R) +(Z_2 + R)]\ (Z_0 + R + 3Z,,)$

Buna göre I_0 = — (I, + I_2) eşitliğinden :

Z_j — — g $\frac{J\ TJ_K}{2\ +}$
0

$(Z, + R)\ (Z, + R) + [(Zj\ 4- R) +(Z_2 + R)](Z_0 + R + Szj,)$

$I_{KII} = - d_s + I_T) = - [I_0 + a2\ I, + a\ I_2 + I_0 + a\ I, + a^\wedge\ I_2] = - [2\ I_0 + (a^* + a)\ (L + 101 = — 3\ L$

Ayrıca I_s ve I_T akımlan için :

$I_s = I_0 + 2?\ \backslash + a\ I_2 = - I, - I_2 + az\ _t + a\ I_2 = (a» - 1)\ I, + (a - 1)\ I_2$

= j V3" a l! - j V3~a' I_2

_ a (Z_2 + R) -
+ R + 3 z,,)

= J V3 E $(Z, + R)\ (Z_2 + R) + [(Z, + R) + (Zj + R)](Z_0 + R + Sz,,)$

_ _ V? V3 $(Z, + R) + j\ [(Z_2 + R) + 2\ (Zp + R + 3zp)]$
2 $(Z, + R)\ (Zj + R) + [(Z, + R) + (Z., + R)](Z_0 + R +$

Aynı yoldan giderek I_T için :

$(Z_2 + R) + (Zp$ R) R) R) — aa + R +
I_T = j V3 E

R)](Z0 R

_ VJ $yT(Z_2 + R) — j\ [(Z_2 + R) + 2\ (Z_0 + R + 3zp)]$
2 $(Z, + R)\ (Z_2 + R) + [(Z, + R) + (Zj + R)](Z,, + R +$

Burada I_s + I_T toplamını bularak I_{KII} akımı elde edilebilirdi. Arızasız R fazının toprağa nazaran gerilimi de bilinmek istenirse; $V_R = V_0 + V, + V_2 = 3Vj$ bağıntısında Vj yerine yukarda hesaplanan değeri konarak elde edilir. Eğer Zj = Z_2 = Z ise:

$$I_{Kn} = — 3\ I_0 = \frac{3E}{(Z + R) + 2\ (Z_0 + R + 3z_0)}$$

$$V_R = \frac{(Z_0 + R + 3z_0)}{(Z + R) + 2\ (Z_0 + R + 3\ zJ}$$

özel hal olarak nötür hattındaki empedans ve arıza geçiş direnci gözönüne alınmadığı durumda, yukarıda çıkarılan bütün sonuçlarda z,, ve R yerine sıfır konmalıdır.

E. EMPEDANSLAR ($Z_{1(}$ Zj, Z,,)

Direkt empedans Z, simetrik yüklenme halindeki işletme empedansıdır. Buna göre hatların faz empedansı, trafoların kısa devre empedansı ve kısa devre anında generatörün empedansı direkt empedanstır.

Ters empedans 2^ statik elektrik cihazlarında örneğin Trafolarda, hatlarda, reaktör bobinlerinde direkt empedansa eşittir. Zira bu cihazların ters dönen simetrik gerilim sistemine gösterdikleri direnç değişmez. Buna karşılık generatörlerde ve motorlarda ters akım sisteminin stator sargılarında meydana getirdiği alan rötara nazaran iki misli senkron devirde ve ters yönde olacağından bilhassa amortisman sargılarında akımlar üretecektir. Bu akımların meydana getireceği alan stator sargılarmdaki ters sistem alanını kısmen kompanse edeceğinden, ters empedans direkt empedansa nazaran daha küçük değerde olacaktır. Kısa devre hesaplarında genellikle generatör dirençleri ihmal edildiği için ters reaktans değerleri için:

4- x' -amortisman sargısız generatörlerde

-amortisman sargılı generatörlerde

Amortisman sargılı turbo generatörlerde x". olacaktır.

x"$_q$ = x"$_d$ olduğu için x_2 « A$_d$ .x

Çıkık kutuplu makineler için x_2 = d · q

bağıntısı daha doğru sonuçlar vermektedir.

Elektrik araçlarına ait direkt ve ters sistem empedansları el kitaplarındaki tablo ve eğrilerden elde edilebilir.

Sıfır reaktans için generatörlerde Xj = (-5- —) x"$_d$ değerleri arasındadır. Trafolarda bu değer bağlantı şekline bağlıdır. Aşağıda muhtelif salt bağlantılarına göre sıfır reaktansın direkt reaktansa oranı değerleri verilmiştir:

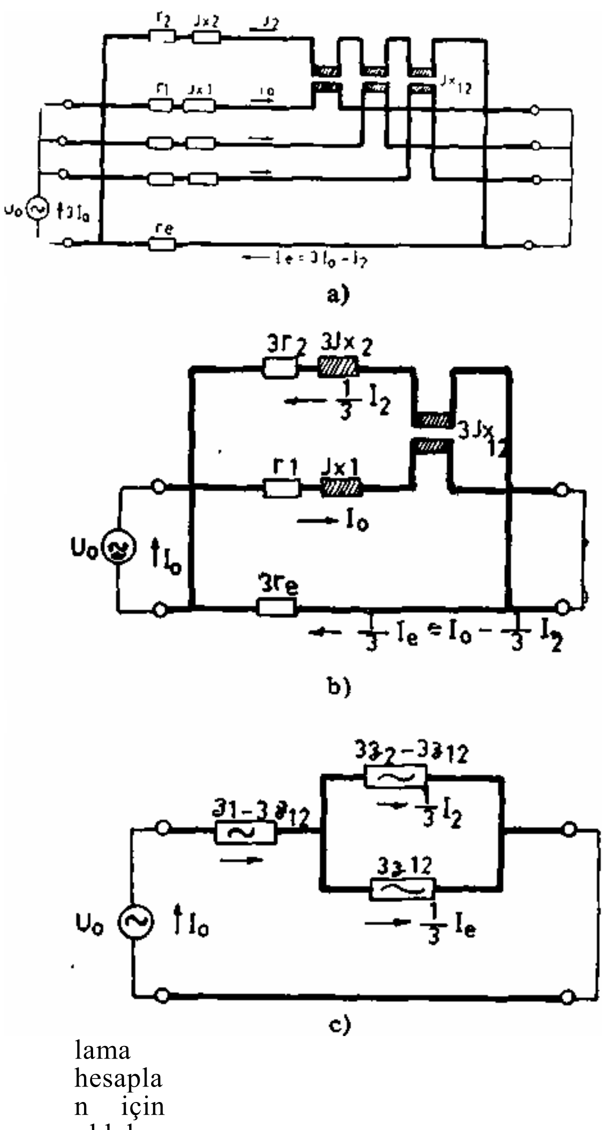
TRAFO ÇEKİRDEĞİ	AA	Xo/Xı A/A	AA
Üç bacaklı	3 10	0,65 0,9	0,10 . 0,B
Beş bacaklı	10 100	1	0,10 ... 0,15
Uç tek fazlı Trafo	10......... 100	1	0,10 0,15

Generatör ve trafolar için sıfır empedans değerleri için gene muhtelif el kitaplarında tablo ve 'eğriler verilmiştir.

Enerji nakil hatlarının sıfır empedansı toprak-

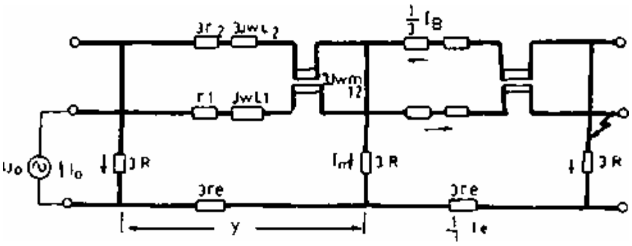
önce tek devreli bir hattın sıfır empedansmı hesaplayalım. Bir nakil hattının sıfır empedansı birçok etkenlere bağlıdır. Şebekenin nötür noktasına geri akan sıfır sistem akımı toprak kitlesinden ve kısmen de toprak iletkeninden geçtiği için diğer etkenler yanında toprak özgül direncinin ve faz iletkeni ile toprak ve toprak iletkeni ile toprak arasındaki mağnetik kuplajın da tesiri büyüktür.

Aşağıdaki şekilden tek devreli nakil hattının sıfır empedansı hesaplanabilir. Kolaylık için önce havai hat direk gövdelerinden geçen akımları ihmal edelim ayrıca birinci ve sonuncu direğin toprak direncini sıfır kabul edelim. Faz iletkenlerinin sıfır sistem akımlarına gösterdiği reaktans j x, ve toprak iletkeni ile kuplaj reaktansı j x_a ve toprak iletkeninin kendi reaktansı j x_2 olsun. Buna göre şekil a tek fazlı şekil b'ye dönüştürülebilir. Şekil b bir trafo eşdeğer bağlantısına tekabül etmektedir, bu sebepten bu da trafonun bilinen T eş-



lama hesaplan için oldukça önemli olduğundan daha ayrıntılı şekilde ele alınması gerekir. Yalnız aşağıda çıkarılan formül ve şekillerde 1 ve' 2 endislerinin simetrik bileşen endisleri ile bir ilgisi olmadığı gözden kaçmamalıdır.

Şekil. 13



Seldi. 14

değer bağlantısı ile gösterilebilir (Şekil 13c). Eşdeğer bağlantının (Şekil. 13c) empedanslan (18) numaralı denklemlerle hesaplanır. Hattın sıfır empedansı ise bağlantının toplam direnci olup (19) denklemi ile tespit edilebilir.

Havai hattın sıfır empedansı için tam ve doğru bağlantı yukardaki şekilde verilmiştir.

Daha evvelce de belirtildiği gibi burada direk topraklama dirençlerine (R) bağlı toprak iletkeni bir zincir iletkeni teşkil eder. Şekilde:

$L_($ Faz iletkeni-Toprak indüktansı L_2

Toprak iletkeni-Toprak indüktansı M_{12}

Kuplaj indüktansı

Toprak kitlesi bilindiği gibi muayyen geçirgenlikte hacimsel yani üç boyutlu bir iletkendir. Akım toprak kitlesi içinde derinliğine ve genişlemesine yayıldığı için arttıkça akım yoğunluğu düşecektir. Toprak kitlesi direnci:

r = *. f . y . 10* [km .] y = direk arası mesafesi [Km] L,, M_{12} indüktanslannı hesaplayabilmek için toprak içinden dağılarak geçen akımı g derinlikte toplu bir halde (konsantre bir huzme) geçtiği kabul edilsin. Bu derinlik :

S =658 -i-

formülü ile hesaplanır; burda 2 [îî m] toprak özgül direnci, f [Hz] ise akımın frekansıdır. Sıfır sistemin indüktansını veren formüllerin elde edilişi tıpkı direkt sistemdeki gibidir ve kolaylıkla bulunabilir, tndüktanslar:

L, = 2,10 [3 in JUL + 0,25] [H/km] (15)

= 2.10 [in JJ.+ 0,25 [H/km] (16) [H/km]

(17)

M,, = 2 .10 in $\frac{--}{h}$

formülleri yardımıyle bulunur.

Burada :

5 = tesir derinliği

D = üç faz iletkenin eşdeğer çapı

$$D = 2\ \sqrt[3]{\frac{1}{2}}$$

d_B = Toprak hattı çapı

h = Eşdeğer iletkenin (D) toprak iletkenine mesafesi

h = $.a_{2B} . a_{3B}$

($j1_B$ = Toprak hattının relatif indüksiyon sabitesi; Al ve Cu için $JJ_{,B}$ = l dir.

d = faz iletkeni çapı

a = Ortalama faz iletkeni aralığı

a = . a

$a_{,2}$ = l ve 2 faz iletkenleri arasındaki mesafe

a_{13} = l ve toprak iletkeni arasındaki mesafe.

Şimdi sıfır sistem empedanslarını hesaplıyahm. Bunun için yine hat direklerinden akan akımları ihmal etmek mecburiyetindeyiz, aksi halde eşdeğer bağlantıyı hesaplamak çok zor olacaktır. Bu ihmal ile faz iletkeni, toprak iletkeni ve toprak kitlesinden akan akımlar her direk aralığı için aynı olacaktır; O halde bir direk aralığının eşdeğer bağlantısı hesaplanıp, formül genelleştirilebilir. ilk şeklin a bağlantısından :

$U_0 = I_0$ (r, — I_2 j x_{12} (3 I_0 —

O $= I_2$ 3 (r_e + j x_u) — I_2 (r_2 + r_e + j x_2)

denklemleri elde edilir. Bunlar aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

U_0 = I,, (rj + 3 r_e + j x,) — I_2(r_e + j x_{12}) O

= I_0 3 (r_e + j x_{12}) — I_2 (r_2 + *r,* + j x_2)

Parantez içindeki ifadeleri z_{lf} Zj ve z_u ile gösterirsek, şekil c'deki sıfır sistem empedanslarını elde etmiş oluruz :

z, = r, + 3r_e + j w L z_z = r_2 + r_e + j w L, (18)

$z_{12} = r_c + j\ w\ M_{12}$

Buradan toprak telli hava hattının toplam karekteristik empedansı

= r_c + j X,, = z, — 3 *#12* -olur.

Enerji nakil hatlarında Xo/x, (sıfır reak./direkt reak.) değerler:

	Tek devre	Çift devre
Toprak iletkensiz	3,2	5,1
Çelik toprak iletkenli	2,9	4,4
Çelik-Al toprak iletkenli	2,5	3,5

çift devre için en basit ve pratik hesap şekli; her bir devre için yukarki eşdeğer şema ve formüllerden hareket edip bunlan paralel bağlamak ile mümkün olur.

100 îîm'de nakil hatlarının karekteristik empedanslan

. TIP	FAZ TELİ KESİTİ mm²	TOPRAK TELİ KESİTİ mm²	NOMİNAL GERİLİM kV	HERBİR DEVRE DİREKT EMP.	HERBİR DEVRE KARAKTERİSTİK EMPEDANSI
4-	95 Al	—	35	0,378+j 0,368	0,526+j 1,576
o o / o \o/ o	95 Al	35 St	35	0,378+ *j* 0,398	0,724 + j 1,779
o o / o \°/ o	95Al	50 St	66	0,378+ j 0/35	0,616 +j 1,366
o / o o / o o o o	2x450/U5 StAl Demet iletkenli çift devre	210/50 StAl	380	0,03+jO,31	0,26 + j 1,38 (Tek devre) 0,15 +j 0,92 (Çift devre)

Kablolar için direnç ve empedans değerleri El kitablarında verilmiştir. Aşağıda Türkiye'de sık kullanılan kablolara ait karekteristik empedanslar bir tablo halinde görülmektedir.

Gerilim	Kesit mm²	fi/Km
10 KV	35	1,27 + j 1,76
	70	1,15 + j 1,52
	150	1,13 + j 1,12
30 KV	50	1,33 + j 0,92
	95	1,12 + j 0,74
	150	0,93 + j 0,62