

İşaret Akışı Diyagramları ile Devrelerin Analizi

Necdet ŞEN
Y. Müh.
Mu. Ok.

ÖZET :

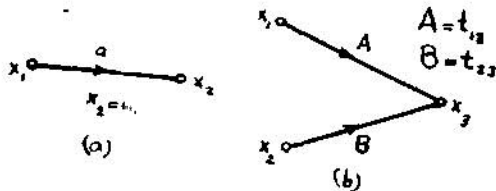
Bu yazıda işaret akışı diyagramlarının çizilmesi, basitleştirilmesi, elektrik devrelerine uygulanışı, Mason metodu ile diyagramın iki düğümü arasındaki transmittansın bulunması, devre fonksiyonlarının hesaplanması anlatılmıştır Çeşitli örnekler verilmiştir.

1. Giriş

Elimizde lineer simültane cebrik denklemlerden müteşkil bir denklem takımının bulunduğunu düşünelim. Bu denklemlerin çözümlerinin, bazı şartların sağlanması kaydıyla çeşitli metodlarla (matris, determinant, adı v.s.) mümkün olduğunu bilmekteyiz. Ancak bazan uzun işlemler sonunda hem zaman kaybı ve hem de yanlışlıklar yapılabilir. Halbuki adı geçen denklemlerin çözümleri, bunları bir takım operasyonel diyagramlar kullanılarak geometrik şekle sokmakla, daha kolay ve kısa olarak elde edilebilir. Bu diyagramlar literatürde lineer denklemlerin, çeşitli fiziksel sistemlerin giriş büyüklükleriyle, sistemin diğer noktalarındaki büyüklükler arasındaki bağıntıların hesaplanmasında kullanılırlar. Bu sistemlerin girişine tatbik edilen uyarma işaretinin, çıkış uçlarında meydana getirdiği tesir bakımından işaret akışı diyagramları (= İAD) veya grafları diye isimlendirilirler. İAD ları genel olarak denklemlerdeki değişkenlerle, değişken katsayılarının bağılıklarını gösterip, bütün lineer sistemlerde (elektirik, elektronik, otomatik kontrol, mekanik, idrolik, v.s.) çeşitli parametre ve devre fonksiyonlarının hesaplanmasında kolaylık sağlamış olurlar.

2 — İşaret Akışı Diyagramlarının Çizimi :

En basit olarak $x_2 = ax_1$, gibi bağıntının İAD ile gösterilişi Şek. 1. a daki gibi olup x_2 değişkenini (düğümünü) x_1 değişkenine (düğümüne) doğru yönlendirilmiş çizgi parçası şeklinde a katsayısı ile bağlamaktan ibarettir. Benzer tarzda $x_3 = Ax_1 + Bx_2$ şeklinde bir denklemin İAD ise Şek 1. b de görülmektedir.



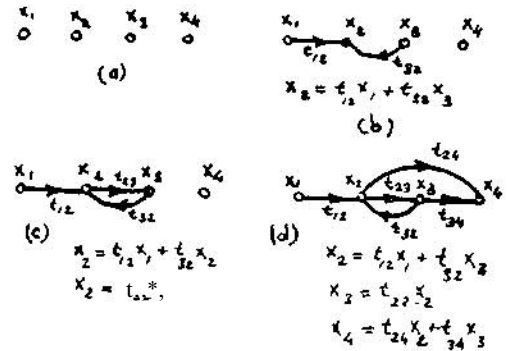
Şekil : t

Şek 1. a ya bakılırsa x_1 den x_2 ye ve Şek. 1. b de ise x_1 ve x_2 den x_3 e doğru yönlü bir akış

varmış gibi düşünülebilir, veya başka bir deyişle düğümler arasında bir işaret transmisyonu olmaktadır. Bu sebeple düğümler arasındaki akış özelliğini haiz olan yönlü a, A, B katsayılarına transmisyon katsayısı veya transmittans adı verilmektedir Şek 1 a da akışın x_1 den x_2 ye ve Şek. 1. b de X_1 ve x_2 den x_3 e olduğu göz önüne alınarak a, A, B katsayılarına (veya en genel olarak katsayı fonksiyonlarına) transmittans kelimesine izafeten, akış yönünü de belirtmek üzere t_{12} , t_{13} , t_{23} notasyonlarını kullanmak daha açıklayıcı olur. Buraya kadar söylediklerimize dayanarak verilen bir lineer simültane cebrik denklem takımının İAD nı çizmek mümkündür Bir misal olmak üzere

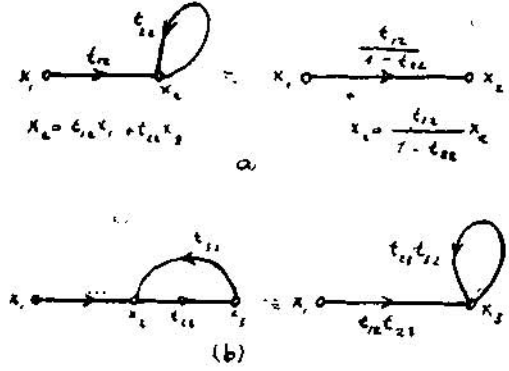
$$\begin{aligned} (a) \quad x_2 &= t_{12}x_1 + t_{13}x_3 \\ (b) \quad x_3 &= t_{23}x_2 \\ (c) \quad x_4 &= t_{24}x_2 + t_{34}x_3 \end{aligned}$$

denklemlerini alalım. Bu denklemlerin İAD lan her bir denklem için teker teker şekil 2 de görüldüğü gibi çizilir. Bunun için önce x_1 , x_2 , x_3 , x_4 değişkenlerini gösteren düğümler şekil 2. a daki gibi işaretlenir. Sonra (a) denkleminin akış diyagramı şekil 2. b deki gibi çizilir; daha sonra (b) denkleminin akış diyagramı buna eklenir şekil 2. c; sonra (c) denklemininki de buna eklenerek denklemlerin göstermiş olduğu toplam İAD çizilmiş olur Şekil 2. d.



Şekil: 2

Şek. 2 de bazı düğümlerde sadece giden kollar, bazılarında gelen, bazılarında" da gelen ve giden kollar bulunmaktadır. Dikkat edilirse x_1 den yalnız t_{12} gitmektedir. Böyle yalnız giden kolları ihtiva eden düğümlere Kaynak Düğüm veya Giriş Düğümü, yalnızca gelen kolları ihtiva eden düğümlere de Yük Düğüm veya Çıkış Düğümü adı verilir. Bu diyagramdan da görüleceği gibi bir İAD da akış yönü, p nci bir düğümden q ncü bir düğüme doğru ise, akışın yönü aksedilemez. Mesela şek. 2. d de t_{23} transmittansının akış yönü tersine çevrilip de $-t_{32}$ şeklinde gösterilemez. Aksi halde denklemlerin de durumu bozulmuş olur.



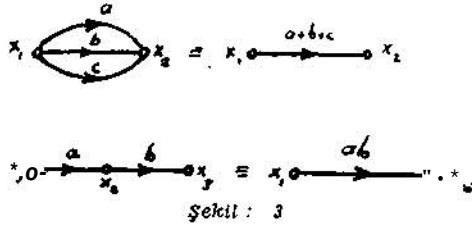
Şekil : 2

3 — İşaret Akışı Diyagramlarının Cebri..

İAD dan gaye, verilen denklemlerin, değişkenleri arasında çeşitli bağıntılar elde etmek olduğuna göre çizilen diyagramların istenilen hesaplar yapmak üzere basitleştirilmiş olması gerekir. Böylece bütün diyagram iyice basitleştirilip sonunda şek. 1. a daki gibi duruma indirilebilir. Bunun için bir takım elemanter işlemler yapmak gerekir.

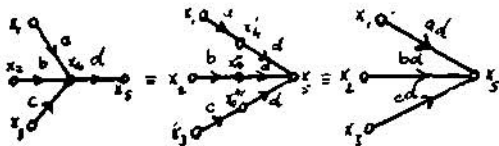
I. Toplama Kaidesi: tki düğüm arasında aynı akış yönünü haiz olan transmittanslar toplanabilir

n — Çarpma Kaidesi : Akış yönleri aynı olan peşpeşe transmittanslar çarpılıp tek bir transmittans haline getirilebilir.



Şekil : 3

İÜ — Düğüm Parçalama Kaidesi : Akış yönleri aynı olan 2 veya daha fazla transmittans, bu düğüme bağlı ve düğümden sonra da aynı akış yönlü bir transmittans şeklinde devam ediyor; bu düğüm, gelen akışların her biri için parçalanıp çarpma işlemi uygulanabilir. Şeş. 4



Şekil : 4

IV — Şelf Transmittans (veya geri besleme çevresi) Kaidesi: Bir düğüme başka bir düğümden ve kendisinden tekrar kendisine bir akış geliyorsa şekil. 5 deki gibi basitleştirilebilir.

Çizilen bir diyagramın basitleştirilmesi bu elemanter işlemlerin kullanılmasıyla mümkün olur. Bu düşüncelerle bir İAD nın herhangi iki düğümü arasındaki transmisyon fonksiyonuna eş değer olan transmittansı bulmaya "Redüksiyon Metodu" denir.

4. İşaret Akışı Diyagramlarının Elektrik Devrelerine Uygulanışı.

Bir devre verildiği zaman bu devrede İAD ile hesap yapmak için, önce bu devre için devre denklemleri yazılır. Bu denklemler, genel olarak bir lineer integro-diferansiyel denklem sistemi halindedirler. Bu denklemlere Laplace veya Fourier Transformasyonu tatbik edilirse, denklemler s veya w değişkenleri cinsinden cebrik denklemlere dönüşürler. Böylece elde edilen cebrik denklemlere göre İAD nı çizmek mümkündür. Ancak bu çizim şeklini sistematik bir şekilde sokmakla sonuca daha kolay varılmış olunur.

Devre topolojisinden hatırlanacağı üzere, verilen bir devreden çizilecek topolojik diyagramdan, seçilen her hangi bir ağaçta, ağaç dışı elemanların akımları bağımsız olup, sayıları da $(e-d + 1)$ tanedir. (1) Böylece bunlar cinsinden $(d-1)$ tane bağımsız Kirçhoff'un akım denklemi yazılır. Bunun gibi ağaç içi gerilimler bağımsız olup sayıları $(d-1)$ tanedir. Bu bağımsız ağaç içi gerilimler cinsinden de $(e-d + 1)$ tane bağımsız Kirçhoffun gerilim denklemi yazılabilir.

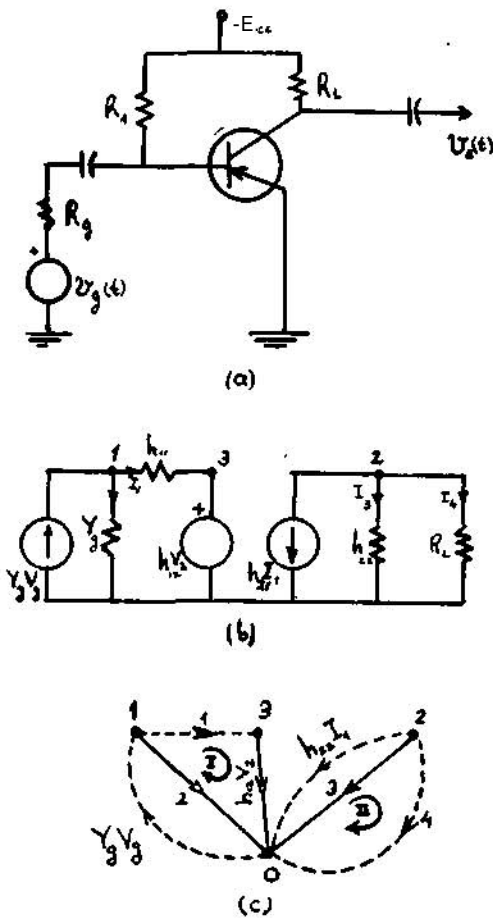
İAD nı çizmek için, devredeki bağımsız gerilim ve akımlar, seçilen ağaçtan bulunur. Burada bu işi yaparken diyagramdan, gerilim kaynaklarını ağaç içi eleman, akım kaynaklarını da ağaç dışı eleman olarak bırakırsak yazılan denklemlerde bulunacak olan bilinmeyen bağımsız akım ve gerilimlerin sayıları azalmış olur.

İAD nın yukarıdaki gibi devre topolojisinden faydalanarak çiziminden sonra bu diyagramlar-

(1) Burada
e : Topolojik diyagramdaki eleman sayısı,
d : Topolojik diyagramdaki düğüm sayısı.

dan çeşitli çözümler ve devre fonksiyonları bulunabilir. Bu zümreden olmak üzere Kazanç, İmtans (empedans ve admitans) fonksiyonları kolaylıkla hesaplanabilir. Bu düşünce tarzına göre, eğer gerilim kazancı fonksiyonu bulunacaksa, her ikisi de gerilim olmak üzere, kaynak düğümü ile çıkış düğümü arasındaki eşdeğer transmittans bulunacak ve eğer giriş empedansı hesaplanacaksa kaynak düğümü (giriş akımı) ile çıkış düğümü bulunacaktır. Benzer düşünce ile diğer devre (giriş gerilimi) arasındaki eşdeğer transmittans fonksiyonlarını da, tariflerine dayanarak gereken düğümler arasındaki eşdeğer transmittansları elde etmek suretiyle hesaplamak kabildir.

Örnek: Şek. 6 deki tranzistorlu amplifikatör katının kazancının hesabı.



Şekil: 6

Bu amplifikatörün IAB ile kazancını hesaplamak için önce devrenin Şek. 6. b deki eşdeğerini çizdikten (burada hybrid parametreleri cinsinden eşdeğer devre çizilmiş olup; h_{11} : tranzistorun giriş empedansı; h_{22} : transistorun çıkış admitansı, h_{12} : transistorun giriş uçları açık devre iken gerilim transfer oranı; h_{21} : Transistorun çıkış uçları kısa devre iken akım transfer oranı

olduğu malumdur.) sonra bu devrede her bir elemana bir topolojik eleman tekabül ettirerek devrenin Şek. 7. c deki topolojik grafi çizilebilir. Diyagramda seçilen uygun ağaç kalın çizgilerle, ağaç dışı elemanlar da kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Gerilim kaynakları ağaç içi eleman ve akım kaynakları ağaç dışı eleman olarak bırakılarak $d-1 = 4-1 = 3$ bağımsız düğüm için Kirchoff'un akımlar kanunu ve $e-d + 1 = 7-4 + 1 = 4$ bağımsız çevre için kirchoff'un gerilimler kanunu yazılabilir. Bununla beraber devrede iki özel durumu göz önüne alırsak meselenin daha basitleşeceği anlaşılır. Bunlar da devredeki,

1 — Akım kaynaklarının bilinmekte olan akımları ile uçlarındaki gerilimleri arasında bir bağıntı olmadığı zaman, bu gerilimler bilinmeyen olarak kalır. Böylece akım kaynaklarının bulunduğu çevrelere Kirchoff'un gerilimler kanununun uygulanmasına lüzum kalmaz., Şek. 6 c deki I ve n çevreleri için gerilim denklemlerini yazmak yetiştir.

2 — Benzer olarak, gerilim kaynaklarının bilinmekte olan akımları arasında bir bağıntı olmadığı için bu akımlar bilinmeyen olarak kalırlar. Böylece gerilim kaynaklarının bağlı oldukları düğümlere de Kirchoff'un akımlar kanununun uygulanmasına lüzum kalmaz. Devrede bu özellik gözetilerek yalnızca 1 ve 2 düğümleri için akım denklemleri yazılmıştır.

O halde 1 ve 2 düğümleri için Kirchoff'un akım denklemleri,

$$1 \text{ düğümü: } -V_g Y_g + V_1 + I_1 - 0 = 0 \quad (a)$$

$$2 \text{ düğümü: } h_{11} I_1 + h_{12} V_1 + I_2 = 0 \quad (b)$$

ve II çevreleri için Kirchoff'un gerilim denklemleri,

$$I \text{ çevresi: } h_{21} T_x + h_{22} V_1 - V_2 = 0 \quad (c)$$

$$H \text{ çevresi: } -V_2 + R_4 T_4 = 0 \quad (d)$$

olup bu denklemlerin IAD'nın çiziminde bağımsız gerilim ve akımlar lüzum olduğuna göre yukarıki iki özelliğe uygun olarak, kaynaklar hariç tutulmak üzere V_1 , V_2 ve I_1 , I_4 değişkenlerini yazdığımız denklemlerden hesaplayabiliriz, (a) denkleminde V_1 , (d) denkleminde V_2 , (c) denkleminde I_1 , (b) denkleminde 14 aşağıdaki gibi bulunur.

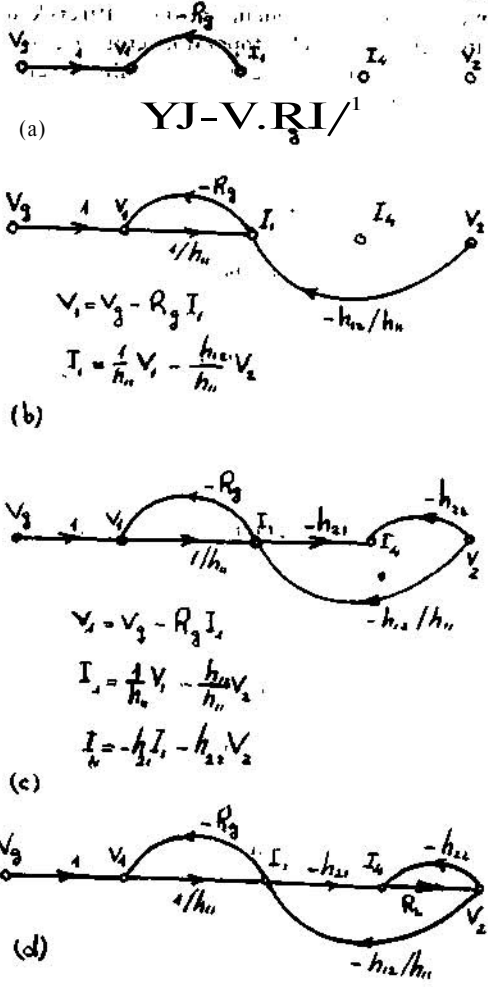
$$V_1 = V_g - R_g I_1 \quad (1)$$

$$I_1 = \frac{1}{h_{11}} V_1 - \frac{h_{12}}{h_{11}} V_g \quad (2)$$

$$I_1 = -h_{21} T_x - h_{22} V_1 \quad (3)$$

$$V_2 = R_4 I_4 \quad (4)$$

Bu denklemlere göre IAD parça parça çizilirse çizim tekniği kolayca anlaşılabilir. Şek. 7



şekil. 7

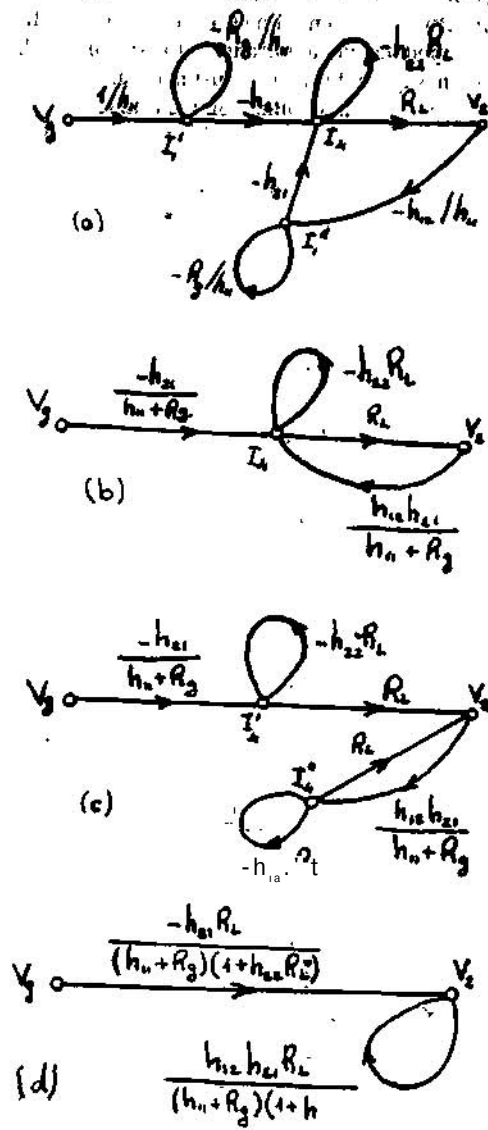
Şek. 7 deki toplam. IAD na redüksiyon metodu uygulanırsa $\frac{V_2}{V_g}$ kazancını cebirsel kaide-lerden faydalanarak bulabiliriz. Önce I, düğümü sonra I, düğümü "parçalanırsa meydana gelen self-transmitansları basitleştirilebilirler. Şek. 8

Böylece bu amplifikatörün II - kazanç fonksiyonu redüksiyon metoduyla bulunmuş olur.

$$J \hat{J}_2 \frac{-h_{21} R_L}{V_g \sim (h_{11} + h_g) (1 + h_{11} R_L) - h_{12} h_{21} R_L}$$

5 - Direkt Metod :

Mason tarafından bulunmuş olan fonksiyonel bir bağıntı ile lineer bir devre için çizilen IAD dâh, diyagramın iki düğümü arasındaki transmits (transmisyon) fonksiyonunu hesaplanması



şekil ; 8

kabildir. Bu bağıntı altında redüksiyon metodunun sistematik bir şekilde sokulmasından ibarettir.

$$T = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^m M_k \Delta_k$$

Burada m: Kaynak düğümü ile çıkış düğümü arasında mümkün olan peş peşe zincir şeklinde aynı akış yönünü haiz olan tali grafların sayısıdır.

Δ : IAD'nın determinanı olup değeri

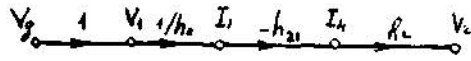
$$A = 1 - \sum_{i=1}^N P_{ii} + \sum_{i=1}^{nX} P_{ii} - \sum_{i=1}^{n3} P_{ii} + \dots$$

Burada P_{ij} : i nci, kendi üzerine kapanan gen besleme akışlarının transmittansları çarpımları toplamı,

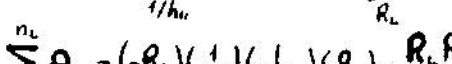
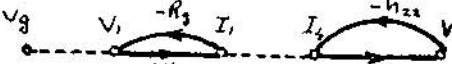
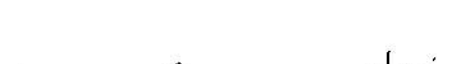
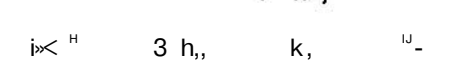
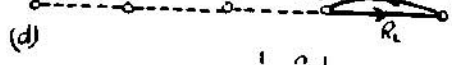
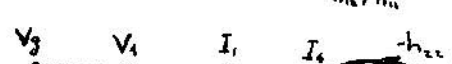
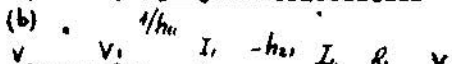
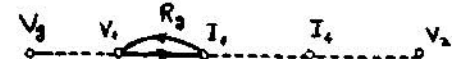
P_{ik} : Peş peşe kapalı bir göz meydana getiren birbirinden bağımsız aynı yönlü akışların transmittansları çarpımlarının toplamı,

M^* : k nci düğüme kadar zincir grafların transmittansların çarpımı

Δ_k : Δ determinantının yalnızca M_k zincir alt graflarından bağımsız olan akış çevrelerini ihtiva eden kısmı (diğer bir deyişle kof aktör determinantları). Şimdi Mason formülü ile Şek. 8 deki toplam IAD'dan V_2/V_1 kazancını hesaplayalım. Şek. 9. a da M_1 zincir grafi, Şek. 10. b de bütün feedback - çevre akışları gösterilmiş olup bunlara bakılarak $\sum_{i=1}^N P_{ii}$ yazılabilir.



$$(a) M_1 = (1) \left(\frac{1}{h_{11}} \right) (-h_{21}) (R_L) = - \frac{h_{21} R_L}{h_{11}}$$



$$\sum_{i=1}^N P_{ii} = (-R_3) \left(\frac{1}{h_{11}} \right) (-h_{22}) (R_L) = \frac{R_L R_3 h_{22}}{h_{11}}$$

Şekil : 9

Şek. 7 deki toplam IAD na bakarsak M_x zincir grafindan bağımsız çevre-graf olmadığı görülür. O halde $\Delta_{\pm k} = \Delta$ dir. Yine g dır ki

$$+ (-1)^h \sum_{i=1}^{nh} P_{ih}$$

$$\sum_{i=1}^{n3} P_{i3} = \sum_{i=1}^{n4} P_{i4} = \dots = 0 \text{ dırlar.}$$

Böylece

$$T_{gs} = \frac{- \left(\frac{h_{21}}{h_{11}} R_L \right) \cdot (1)}{1 - \frac{-R_B + R_L (h_{12} h_{21} - h_{11} h_{22})}{h_{11}}} + \frac{R_L R_3 h_{22}}{h_{11}}$$

$$= \frac{- h_{21} R_L}{(h_{11} + R_L) (1 + h_{22} R_L) - h_{12} h_{21} R_L}$$

olarak bulunur ki bu sonuç redüksiyon metodu ile bulunan sonucun aynıdır.

6. İşaret Akışı Diyagramları ile Devre Fonksiyonlarının hesabı

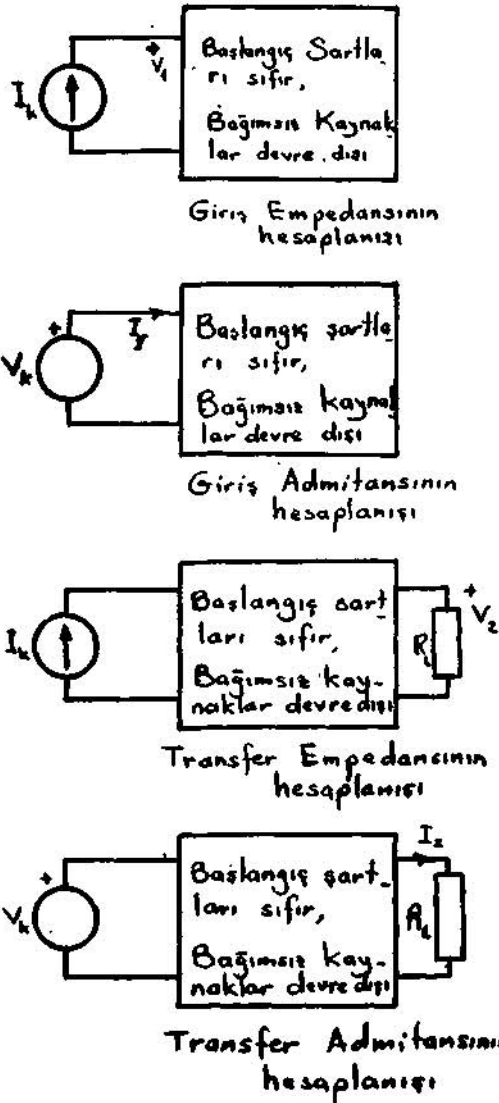
Bir lineer devrenin giriş ve çıkış uçları arasındaki akım-gerilim büyüklükleri arasındaki bağıntılara Devre Fonksiyonları denildiğini biliyoruz. Bu tipten fonksiyonların hesabında, devredeki şelf ve kapasitelerden dolayı devre denklemlerine giren başlangıç şartları sıfır olarak alınır ve bütün bağımsız kaynaklar devre dışı (akım kaynaklarının uçları açık devre ve gerilim kaynaklarının uçları da kısa devre edilmek suretiyle) bırakılır.

Böylece hesaplanacak devre fonksiyonları, Giriş Fonksiyonu ve Transfer Fonksiyonu şeklinde iki çeşit olup, bunların hesabında Laplace veya Fourier Transformasyonları kullanılarak s veya w domeninde rasyonel bağıntılar elde edilir.

Bir devre fonksiyonununun tarifi,

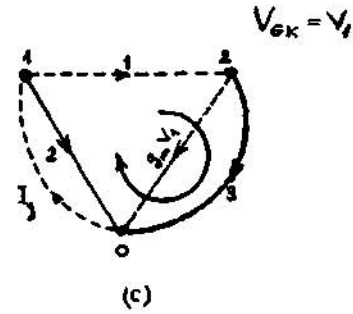
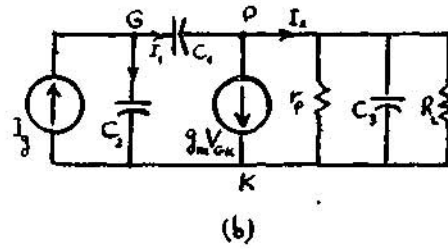
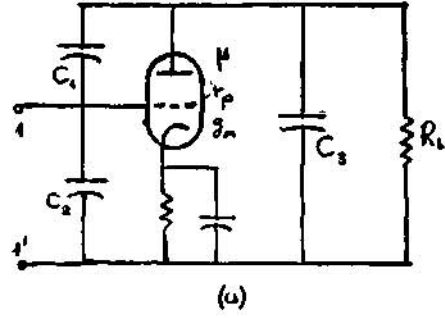
$$\text{Devre Fonksiyonu} = \frac{\text{Çözüm (Respons) Fonksiyonu}}{\text{Kaynak Fonksiyonu}}$$

şeklinde olup, bunların çeşitlerine göre hesaplanmış tarzı İAD bakımından Şek. 10 da görülmektedir. Meselâ giriş fonksiyonu hesaplanacaksa nihai İAD nda kaynak düğümü giriş akımını, çıkış düğümü giriş uçlarındaki gerilimi göstermelidir; yine eğer giriş admitansı hesaplanacaksa kaynak düğümü giriş gerilimini, çıkış düğümü giriş akımını göstermelidir. Benzer şekilde transfer empedansı hesaplanacaksa kaynak düğümü girişi akımını, çıkış düğümü de çıkış uçlarındaki gerilimi göstermelidir; transfer admitansı hesaplanacaksa kaynak düğümü devrenin giriş uçlarındaki gerilimi ve çıkış düğümü de çıkış akımını göstermelidir. Bu özellik göz önüne alınarak Şek. 10 da devre fonksiyonlarının hesaplanmasında, giriş uçlarına gereken kaynak bağlantıları yapılmıştır.



Şekil 10

Misal: Şek. 11 deki devrenin giriş empedansının hesabı



Şekil : 11

Giriş fonksiyonunun tarifi icabı 1-1' uçlarına I_x akım kaynağını bağlayalım böylece Şek. 11 b deki gibi devrenin eşdeğeri çizilmiş olacaktır. Eşdeğer devreye bakarak Şek. 11. c deki topolojik diyagramı çizmek mümkündür. Bu diyagramda akın kaynakları ağaç dışı eleman olarak alınmıştır. I_x akımı yine ağaç dışı ve V_1 , V_2 gerilimleri de ağaç içi eleman olarak alındığına göre yazacağımız şu denklemlerde bunları bulmak kabildir. r_p , C_3 , R_L 'yi birlikte düşünerek 1,2 düğümleri için Kirchoff'un akımlar kanunu ve gösterilen çevre için gerilimler kanunu uygulanırsa şu denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned}
 -I_x + sC_1 V_1 + I_x &= 0 \\
 -I_1 + g_p V_x + (g_p + sC_3 V_2 - Y_L)V_2 &= 0 \\
 \sim W_1 + \sim I_c + V_8 &= 0
 \end{aligned}$$

yazılan bu denklemlerden bağımsız değişkenler

çekilirse elde edilen (birincisinden I_a ; ikincisinden V_2 ; üçüncüsünden V_j)

$$V_1 = \frac{1}{sC_1} I_1 + V_2$$

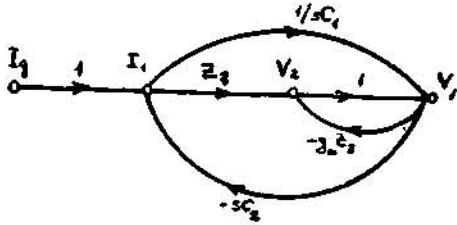
$$V_2 = Z_3 - g_m Z_3 V_1$$

$$I_1 = I_g - sC_2 V_1$$

(Burada

$$g_p + .C. + Y_L = Y_3 = 1/Z_3 \text{ dir})$$

denklemlerinden I kaynak ve V_x çıkış düğümü olmak üzere IAD, Şek. 12 teki elde edilir.



Bu IAD na Mason formülü uygulanırsa

$$T_{g1} = Z_{11}'(s) = \frac{Z_3 + \frac{1}{sC_1}}{1 - \left(-sC_2 Z_3 - g_m Z_3 - \frac{C_2}{C_1} \right)}$$

ve buradan da

$$Z_{11}'(s) = \frac{1 + sC_1 Z_3}{s(C_1 + C_2) + C_1 Z_3 (g_m + sC_1)}$$

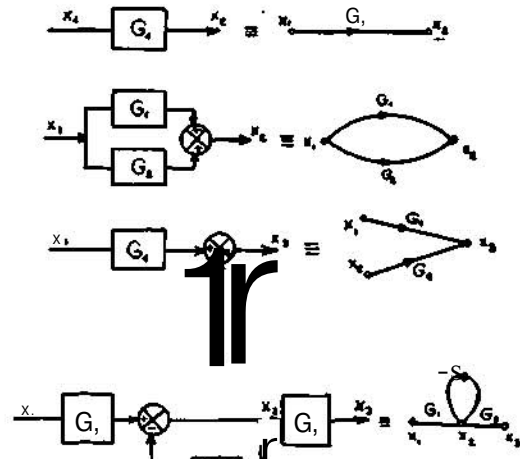
bulunur.

7. İşaret Akışı Diyagramlarıyla Blok Diyagramlar arasındaki Bağlılıklar.

Bir devrenin veya bir kontrol sistemi devresinin blok diyagramı, bu devreler için çizilecek olan IAD dan bulunabileceği gibi tersine olarak blok diyagramı bilinen bir sistemin istenen transfer fonksiyonu bu blok diyagramdan çizilecek olan IAD dan da bulunabilir.

Blok diyagramlarıyla IAD lar arasındaki bağıntılar aşağıdaki tablodaki gibidir.

Elektrik Mühendisliği 02

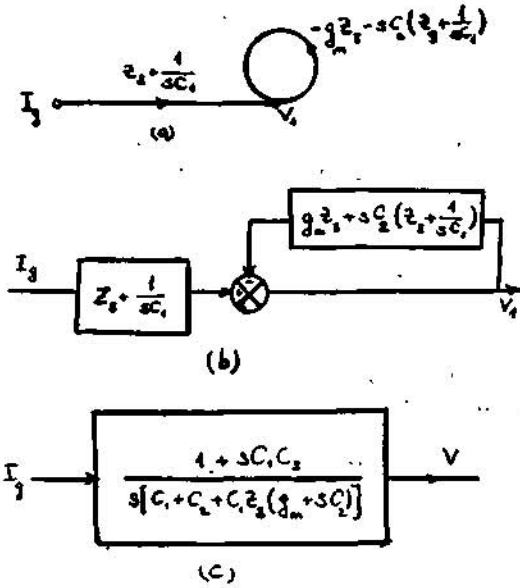


Şekil 13

Örnek 1.

Şek. 12 teki IADnın blok diyagramı, tablo yardımıyla kolayca çizilebilir. Bunun için önce IAD nı bir miktar basitleştirip Şek. 13 teki tabloda gösterilen dönüşümler uygulanır.

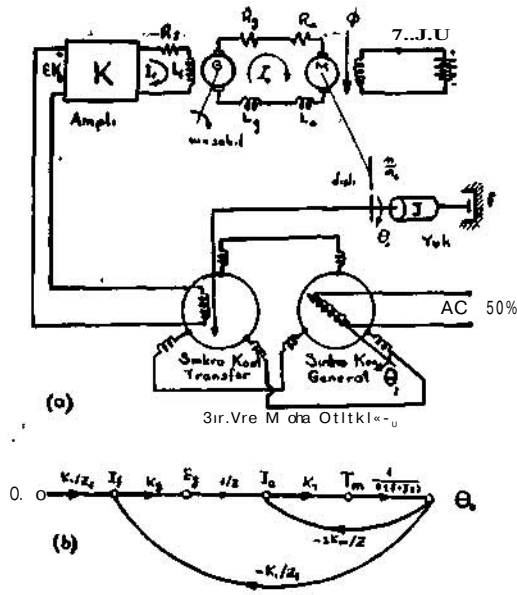
Şek. 12 te önve V_2 düğümünü ifna eder ve $1/sC_j$ ile sC_2 transmittanslarını birlikte düşünerek IAD Şek. 14-a daki duruma getirilir.



Şekil : 14

Örnek 2:

Şek. 15. a daki armatür kontrollü D.C. motoru ihtiva eden servo sisteminin transfer fonksiyonunun IAD ile "bulunuşu.



Şekil : 15

Sisteme ait denklemler yazılarak IAD çizilebilir.

Amplifikatör devresi için:

$$eK \cdot K = K K_f \cdot (9I - 0_o) = (R_f + sL_f) I_f(s)$$

$$E = (\theta_i - \theta_o)$$

denklemi yazılır, (burada K, sinkro hata detektörünün duyarlılığı, K amplifikatörün kazancı, θ_o çıkış, θ_i giriş durumlarıdır) bu denklemden

$$I_f(s) = \frac{KK_f}{L_f s} (\theta_i - \theta_o) \quad \text{bulunur.}$$

Generatörün uçlarındaki gerilim, K generatör sabiti olmak üzere

$$E_g = K \cdot I_f(s)$$

Motor - generatör devresi için E_m motorun zıt emk olmak üzere yazılacak olan

$$E_g(s) - E_m(s) = \left[R_g + R_m + s(L_{kg} + L_m) \right] I(s)$$

$$I(s) = Z(s) I(s)$$

Ve dişli oranını göz önüne alarak zıt emk

$$E_m(s) = sK'_m \frac{-\dot{\theta}_o}{\omega} (s) - sK_m e_o(s)$$

denklemlerinden $I(s)$ akımı

$$I(s) = \frac{E_g(s)}{Z(s)} - \frac{sK_m}{Z(s)} \theta_o(s)$$

Olarak bulunur.

Diğer taraftan servo motorun muindeki moment, K'_T moment katsayısını, $\phi = K_j I_m$ motorun ikaz sargılarının hasil ettiği mağnetik akıyı göstermek üzere

$$T_{ra} = K'_T \phi I_m = K'_T K_j \phi I_m I \gg K_T I$$

yazılarak bu moment, motorun miline akuple edilmiş yükün eğlemsizlik momentini ve sürtünme katsayısını da göz önüne alarak

$$T_m = (JsM - fs)_{\omega} [s]$$

şeklinde yazılıp $\theta_o(s)$ çıkışı

$$\theta_o(s) = \frac{T_m}{j_s + fs} \quad \text{olarak elde edilir.}$$

Yazdığımız bu denklemlerden hareketle artı'c IAD çizilebilir.

$\theta_o(s)$, $I_f(s)$, $E_g(s)$, $I(s)$, $T_m(s)$, $e_o(s)$ düğüm-

lerinin alınmasıyla toplam IAD Şek. 16 b de görülmektedir.

Şekil. 15.b deki IAD na bakarak do 19i transfer fonksiyonu Mason formülüyle derhal hesaplanabilir.

