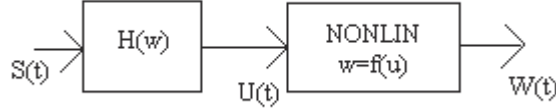


NONLİNEER ELEKTRONİK DEVRELERİN ANALİZİ

1.KUVVET SERİLERİ İLE ANALİZ

Nonlineer bir devreyi, frekansa bağlı lineer bir devre ile frekanstan bağımsız nonlineer bir devrenin kaskat bağlanması şeklinde gösterebilirsek nonlineer analiz için **kuvvet serisi** yaklaşımı yeterlidir[4,5].



ŞEKİL-1 Kuvvet Serilerinin kullanılabileceği devre

$$W(t) = f(U(t)) = a_1 U(t) + a_2 U^2(t) + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} a_n U^n(t) \quad (1-a)$$

$$U(\omega) = H(\omega) S(\omega) \quad (1-b)$$

Frekans domeninde analiz yapmak daha anlamlı sonuçlar vereceğinden girişteki işareti farklı frekanstaki işaretlerin toplamı olarak düşünebiliriz,

$$V_s(t) = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q V_{sq} (e^{j\omega_q t} + e^{-j\omega_q t}) \quad (2-a)$$

$$V_s \cos(\omega t) = \frac{1}{2} V_s (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \quad (2-b)$$

Bu durumda U(t) işareti şu hale gelir;

$$U(t) = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q V_{sq} H(\omega_q) [\exp(j\omega_q t) + \exp(-j\omega_q t)] \quad (3)$$

Çıkış işareti ise

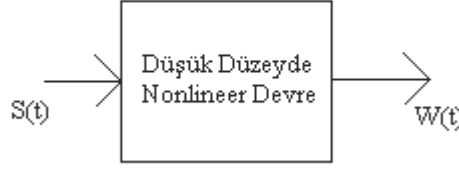
$$W(t) = \sum_{n=1}^N a_n U^n(t) \quad (4)$$

$$a_n U^n(t) = \frac{a_n}{2^n} \sum_{q_1=1}^Q \sum_{q_2=1}^Q \dots \sum_{q_n=1}^Q V_{sq_1} V_{sq_2} \dots V_{sq_n} H(\omega_{q_1}) H(\omega_{q_2}) \dots H(\omega_{q_n}) \cdot [\exp(j\omega_{q_1} t) + \exp(-j\omega_{q_1} t)] \dots [\exp(j\omega_{q_n} t) + \exp(-j\omega_{q_n} t)] \quad (4-b)$$

olur.

2. VOLTERRA SERİLERİ İLE ANALİZ

Şekil-1'deki yapıyı uygulayamayacağımız devrelerde **kuvvet serisi** yaklaşımı kullanılamaz. Devre şayet düşük düzeyde nonlineerlik gösteriyorsa **Volterra serileri** kullanılabilir[1,2,3,4,5]. Bu durumda Şekil-1'deki gösterilim Şekil-2'deki gibi olur.



ŞEKİL-2 Nonlineerliğin frekansa bağlı olduğu durumda devre bloğu

Volterra serisi yaklaşımı kullanılırsa $W(t)$ şu biçimi alır;

$$W(t) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2^n} \sum_{q_1=1}^Q \sum_{q_2=1}^Q \dots \sum_{q_n=1}^Q V_{Sq_1} V_{Sq_2} \dots V_{Sq_n} H_n(\omega_{q_1}, \omega_{q_2}, \dots, \omega_{q_n}) \cdot [\exp(j\omega_{q_1}t) + \exp(-j\omega_{q_1}t)] \cdot [\exp(j\omega_{q_2}t) + \exp(-j\omega_{q_2}t)] \dots [\exp(j\omega_{q_n}t) + \exp(-j\omega_{q_n}t)] \quad (5)$$

Farkedilebileceği gibi Volterra-serilerindeki tek değişiklik $a_n H(\omega_{q_1}) \cdot H(\omega_{q_2}) \dots H(\omega_{q_n})$ büyüklüğü yerine $H_n(\omega_{q_1}, \omega_{q_2}, \dots, \omega_{q_n})$ büyüklüğünün gelmesidir. Bu değişiklik nonlineerliğin frekansa bağımlılığını ortaya koyar. Dolayısıyla kuvvet serileri yaklaşımının Volterra serileri yaklaşımının bir özel hali olduğu söylenilebilir.

2-1. NONLİNEERLİK FONKSİYONLARININ BULUNMASI

Eğer nonlineer elemanların nonlineerlikleri kuvvet serileri ile ifade ediliyorsa aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

- n. derece nonlineerlik fonksiyonu daha düşük derecedeki nonlineerlik fonksiyonlarına bağlıdır. Dolayısıyla önce H_1 bulunur, daha sonra H_2 ve bu işlem bu şekilde sırası ile devam eder.
- H_1 lineer devrenin geçiş fonksiyonudur. Dolayısıyla nonlineer elemanlar yerine lineer bileşenleri bırakılarak devre çözülürse H_1 elde edilir.
- En genel halde H_n fonksiyonunun elde edilebilmesinin en kolay yolu girişte

$$V_i = e^{j\omega_1 t} + e^{j\omega_2 t} + \dots + e^{j\omega_n t} \quad (6)$$

işaretinin olduğu halde devrenin çözümünü yapmaktadır. Dikkat edilirse $e^{j\omega t}$ büyüklüğü reel değildir. Sadece çözümü kolaylaştırdığı için tercih edilmektedir. Bu durumda devrede oluşacak sadece $e^{j(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n)t}$ ifadeli işaretler gözönüne alınır, çünkü bu işaretlerin kendi belirlediği çözüm diğerlerinden bağımsızdır (süperpozisyon ilkesi). Bu H_n 'in çözümünde en genel haldir. Sadece sözkonusu işaretler gözönüne alındığından girişteki kaynak bu çözüm sırasında sıfır alınır.

Çıkış işareti Volterra serileri ile analiz sırasında şöyle olur,

$$V = H_1(\omega)V_i + H_2(\omega_1, \omega_2)V_i^2 + H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3)V_i^3 + H_4(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)V_i^4 + H_5(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)V_i^5 + \dots \quad (7)$$

Devrenin girişindeki işaret şöyle seçilebilir(ki Hn fonksiyonlarının bulunmasını basitleştirir),

$$V_i = \sum_k V_k \quad , \quad V_k = e^{j\omega_k t} \quad (8)$$

Çıkış işareti olarak nonlineer bir direncin üzerinde oluşan gerilimi alalım. İki uçlu bir direncin nonlineerliği şöyle ifade edilebilir,

$$I = k_1 V + k_2 V^2 + k_3 V^3 + \dots \quad (9)$$

Giriş işaretinin n. Kuvvetine bağlı olarak çıkışta(nonlin. Direncin üzerinde) oluşan işaretler,

1. derece;

$$k_1 H_1(\omega) V_1 \quad (10-a)$$

Girişteki herhangi bir işaretin etkisi ile oluşan $e^{j\omega t}$ ifadeli çıkış işareti

$$k_1 H_1(\omega) e^{j\omega t} \quad (10-b)$$

2. derece;

$$k_1 H_2(\omega_1, \omega_2) V_1^2 + k_2 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) V_1^2 \quad (11-a)$$

Çıkışta oluşan $e^{j(\omega_1 + \omega_2)t}$ ifadeli terimlerin toplamı

$$\{k_1 H_2(\omega_1, \omega_2) + k_2 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2)\} 2e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} \quad (11-b)$$

3. derece;

$$k_1 H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3) V_1^3 + k_2 H_1(\omega_1) H_2(\omega_2, \omega_3) V_1^3 + k_3 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) V_1^3 \quad (12-a)$$

Çıkışta oluşan $e^{j(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)t}$ ifadeli terimlerin toplamı

$$[k_1 H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3) + \frac{2}{3} k_2 \overline{H_1(\omega_1) H_2(\omega_2, \omega_3)} + k_3 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3)] 6e^{j(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)t} \quad (12-b)$$

4. derece;

$$k_1 H_4(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4) V_1^4 + k_2 [2H_1(\omega_1) H_3(\omega_2, \omega_3, \omega_4) + H_2(\omega_1, \omega_2) H_2(\omega_3, \omega_4)] V_1^4 + k_3 3 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_2(\omega_3, \omega_4) V_1^4 + k_4 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_1(\omega_4) V_1^4 \quad (13-a)$$

Çıkışta oluşan $e^{j(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4)t}$ ifadeli terimlerin toplamı

$$\left(\begin{aligned} & k_1 H_4(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4) + k_2 \left(\frac{1}{2} \overline{H_1(\omega_1) H_3(\omega_2, \omega_3, \omega_4)} + \frac{1}{3} \overline{H_2(\omega_1, \omega_2) H_2(\omega_3, \omega_4)} \right) \\ & + \frac{1}{2} a_3 \overline{H_1(\omega_1) H_2(\omega_2) H_2(\omega_3, \omega_4)} + a_4 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_1(\omega_4) \end{aligned} \right) 24e^{j(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4)t} \quad (13-b)$$

5. derece;

$$k_1 H_5(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5) V_1^5 + k_2 2 [H_2(\omega_1, \omega_2) H_3(\omega_3, \omega_4, \omega_5) + H_1(\omega_1) H_4(\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)] V_1^5 + k_3 3 [H_1(\omega_1) H_2(\omega_2, \omega_3) H_2(\omega_4, \omega_5) + H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_3(\omega_3, \omega_4, \omega_5)] V_1^5 + k_4 4 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_2(\omega_4, \omega_5) V_1^5 + k_5 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_1(\omega_4) H_1(\omega_5) V_1^5 \quad (14-a)$$

Çıkışta oluşan $e^{j(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5)t}$ ifadedeli terimlerin toplamı

$$\left(\begin{array}{l} k_1 H_5(\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_5) + \\ k_2 \left(\frac{1}{5} \overline{H_2(\omega_1, \omega_2) H_3(\omega_3, \omega_4, \omega_5)} + \frac{2}{3} \overline{H_1(\omega_1) H_4(\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)} \right) \\ + k_3 \left(\frac{1}{5} \overline{H_1(\omega_1) H_2(\omega_2, \omega_3) H_2(\omega_4, \omega_5)} \right) \\ + \frac{3}{10} \overline{H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_3(\omega_3, \omega_4, \omega_5)} \\ + \frac{2}{5} k_4 \overline{H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_2(\omega_4, \omega_5)} \\ + k_5 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_1(\omega_4) H_1(\omega_5) \end{array} \right) 120 e^{j(\omega_1 + \dots + \omega_5)t} \quad (14-b)$$

Bu tabloda üstü çizili terimler görülmektedir. Bu terimler aslında içerdikleri nonlineerlik fonksiyonlarının frekanslar açısından farklı kombinezonlardaki çarpımlarının toplamıdır. Örnek olarak H_2 ile H_3 'ün çarpımını göz önüne alalım.

$$\begin{aligned} \overline{H_2(\omega_1, \omega_2) H_3(\omega_3, \omega_4, \omega_5)} &= H_2(\omega_1, \omega_2) H_3(\omega_3, \omega_4, \omega_5) + H_2(\omega_1, \omega_3) H_3(\omega_2, \omega_4, \omega_5) + \\ &H_2(\omega_1, \omega_4) H_3(\omega_2, \omega_3, \omega_5) + H_2(\omega_1, \omega_5) H_3(\omega_2, \omega_3, \omega_4) + H_2(\omega_2, \omega_3) H_3(\omega_1, \omega_4, \omega_5) + \\ &H_2(\omega_2, \omega_4) H_3(\omega_1, \omega_3, \omega_5) + H_2(\omega_2, \omega_5) H_3(\omega_1, \omega_3, \omega_4) + H_2(\omega_3, \omega_4) H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_5) + H_2(\omega_3, \omega_5) H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_4) + \\ &H_2(\omega_4, \omega_5) H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \end{aligned}$$

$H_n(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ fonksiyonlarının sonucu bulunurken parantez içindeki frekansların sıralamasının bir etkisi yoktur.

Önce 1. derece için çözüm yapılır, böylece H_1 bulunur. Daha sonra 2. derece için çözüm yapılır ve H_2 bulunur. Bu şekilde işlem devam eder.

Görüldüğü gibi n. derece akım (veya gerilim) bağıntıları, n. derece nonlineerlik fonksiyonu ile beraber daha düşük derecedeki fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bu durumda şöyle bir yaklaşım yapılabilir;

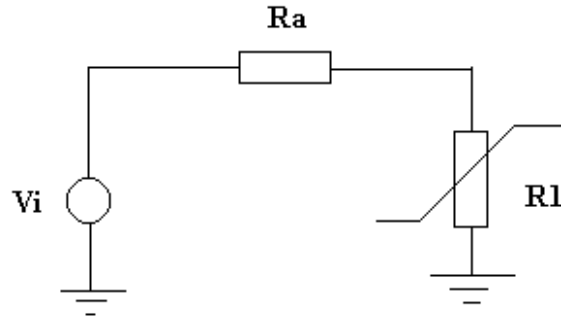
* n. derece nonlineerlik fonksiyonu sebebi ile oluşan terim ilgili elemanın lineer bileşeni ile ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bu terim sözkonusu nonlineer elemanın lineer bileşeninin uçları arasında oluşan gerilim (veya akım) olarak düşünülebilir.

* n. dereceden daha düşük derecedeki nonlineerlik fonksiyonları, n. derece nonlineerlik fonksiyonu ile ortak bir terim oluşturmamaktadırlar. Yukarıda belirtildiği gibi H_n 'in bulunabilmesi için daha düşük derecedeki nonlineerlik fonksiyonlarının bilinmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu büyüklükler (H_n 'i içermeyen terimler) akım (veya gerilim) kaynağı olarak kabul edilebilirler. **Böylece bir nonlineer elemanı (nonlineerlik fonksiyonlarının bulunması için) lineer bileşen ile akım kaynağının (veya gerilim kaynağının) paralel (seri) bağlı hali olarak gösterebiliriz. Burada Akım (gerilim) kaynağının ifadesinin her bir nonlineerlik fonksiyonu için farklı olacağını unutmamak gerekir.** Nonlineer ifadeleri 5. dereceye kadar Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo-1 Nonlinear bir dirence ilişkin nonlinear kaynaklar için ifadeler.

2.derece	$k_2 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2)$
3.derece	$\frac{2}{3} k_2 \overline{H_1(\omega_1) H_2(\omega_2, \omega_3)} + k_3 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3)$
4.derece	$k_2 \left(\frac{1}{2} \overline{H_1(\omega_1) H_3(\omega_2, \omega_3, \omega_4)} + \frac{1}{3} \overline{H_2(\omega_1, \omega_2) H_2(\omega_3, \omega_4)} \right)$ $+ \frac{1}{2} a_3 \overline{H_1(\omega_1) H_2(\omega_2) H_2(\omega_3, \omega_4)} + a_4 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_1(\omega_4)$
5.derece	$k_2 \left(\frac{1}{5} \overline{H_2(\omega_1, \omega_2) H_3(\omega_3, \omega_4, \omega_5)} + \frac{2}{3} \overline{H_1(\omega_1) H_4(\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)} \right)$ $+ k_3 \left(\frac{1}{5} \overline{H_1(\omega_1) H_2(\omega_2, \omega_3) H_2(\omega_4, \omega_5)} + \frac{3}{10} \overline{H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_3(\omega_3, \omega_4, \omega_5)} \right)$ $+ \frac{2}{5} k_4 \overline{H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_2(\omega_4, \omega_5)}$ $+ k_5 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) H_1(\omega_3) H_1(\omega_4) H_1(\omega_5)$

ÖRNEK-1



Şekil-3 Basit bir nonlinear devre

Bu devrede R_1 elemanın nonlinearlığı

$$I_{R_1} = g_1 V_{R_1} + g_2 V_{R_1}^2 + g_3 V_{R_1}^3 + \dots \quad (15)$$

olsun. Bu devre için nonlinearlık fonksiyonlarını bulalım;

H₁ için çözüm:

$$V_{R1} = H_1(\omega)V_i + H_2(\omega_1, \omega_2)V_i^2 + H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3)V_i^3 + \dots \quad (16)$$

$V_i = e^{j\omega t}$ olarak seçelim.

$$I_{R1} = I_{Ra} \quad (17)$$

I_{R1} akımı için $e^{j\omega t}$ li terim sadece bir tanedir, diğer bütün terimler 2ω ve daha büyük değerlidir;

$$I_{R1}^1 = g_1 H_1 e^{j\omega t} \quad (18)$$

$$V_{R1}^1 = H_1 e^{j\omega t} \quad (19)$$

$$V_{Ra}^1 = I_{R1}^1 R_a = R_a g_1 H_1 e^{j\omega t} \quad (20)$$

$$V_i = V_{Ra}^1 + V_{R1}^1 \quad (21)$$

$$e^{j\omega t} = (R_a g_1 H_1 + H_1) e^{j\omega t} \Rightarrow 1 = R_a g_1 H_1 + H_1 \quad (22)$$

$$H_1 = \frac{1}{1 + g_1 R_a} \quad (23)$$

Sonucu elde edilir. Bu çözüm nonlinear direnç R_1 yerine linear bileşeni ($\frac{1}{g_1}$) bırakılarak da elde edilebilirdi.

H₂ için çözüm:

$$V_i = e^{j\omega_1 t} + e^{j\omega_2 t} \quad (24)$$

olarak seçelim.

Sadece $e^{j(\omega_1 + \omega_2)t}$ li terimler alınır;

$$V_{R1}^{\text{II}} = H_2(\omega_1, \omega_2) 2e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} \quad (25)$$

$$I_{R1}^{\text{II}} = [g_1 H_2(\omega_1, \omega_2) + g_2 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2)] 2e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} \quad (26)$$

H fonksiyonları, devreden görülebileceği gibi, frekanstan bağımsızdır. Frekansa bağlı gibi gösterilmelerinin sebebi, frekansa bağlı durumda ortaya çıkacak bağıntıların gösterilmek istenmesidir. Dolayısıyla

$$V_{R1}^{\text{II}} = H_2 2e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} \quad (27)$$

$$I_{R1}^{\text{II}} = [g_1 H_2 + g_2 H_1^2] 2e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} \quad (28)$$

ifadeleri elde edilir.

$$V_{Ra}^u = I_{R1}^u R_a = R_a [g_1 H_2 + g_2 H_1^2] 2e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} \quad (29)$$

Girişte $e^{j(\omega_1 + \omega_2)t}$ 'li işaret olmadığı için

$$V_{R1}^u + V_{Ra}^u = 0 \quad (30)$$

ifadesi devreden elde edilir.

$$H_2 2e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} + R_a [g_1 H_2 + g_2 H_1^2] 2e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} = 0 \quad (31)$$

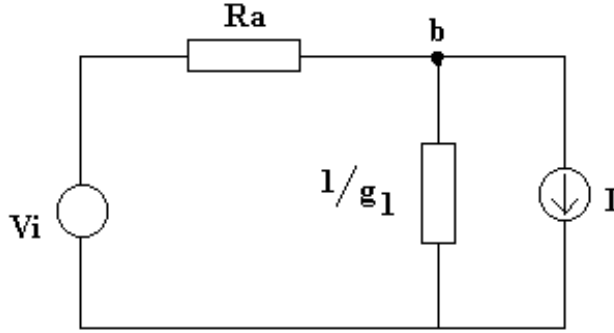
$$H_2 = -\frac{R_a g_2 H_1^2}{1 + R_a g_1} \quad (32)$$

sonucu elde edilir. Şayet H fonksiyonları frekansa bağlı olsaydı

$$H_2(\omega_1, \omega_2) = -\frac{R_a g_2 H_1(\omega_1) H_2(\omega_2)}{1 + R_a g_1} \quad (33)$$

ifadesi elde edilecekti. Sonuçta frekanstan bağımsız nonlineerlik fonksiyonları elde edilmektedir ki nonlineerlik transfer fonksiyonu bir kuvvet serisi olmaktadır. Bu örnek nonlineerlik fonksiyonlarının elde edilmesindeki temel yaklaşımı basit bir şekilde göstermek için seçilmiştir.

Nonlineer akım kaynakları yaklaşımı ile çözüm



Şekil-4 Devrenin nonlineer akım kaynağı yaklaşımı için görünüşü

H₁ için

$$I = I_1 = 0 \quad (34)$$

$$V_i = R_a g_1 H_1 V_i + H_1 V_i \Rightarrow H_1 = \frac{1}{1 + R_a g_1} \quad (35)$$

H₂ için

$$I=I_2=g_2 H_1(\omega_1) H_1(\omega_2) = g_2 H_1^2 \quad (36)$$

(Nonlineerlik fonksiyonlarının bulunması kısmında 2. derece formüller için verilen ifadelerden elde edilir.)

$$V_b=H_2(\omega_1, \omega_2) \quad (37)$$

$$V_i=0 \quad (38)$$

$$-\frac{H_2(\omega_1, \omega_2)}{R_a} = \frac{H_2(\omega_1, \omega_2)}{g_1} + I_2 \quad (39)$$

$$H_2 = -\frac{R_a g_2 H_1^2}{1 + R_a g_1} \quad (40)$$

Bu şekilde I yerine n. derece nonlinear kaynak koyularak çözüm sürdürülür. Nonlineerlik $V=g_1 I+g_2 I^2+\dots$ şeklinde verilirse sözkonusu kaynak, linear bileşene (g_1) seri gerilim kaynağı olur.

2-2. Nonlinear Akım Kaynakları Yöntemi ile Nonlineerlik Fonksiyonlarının Bulunması

Nonlinear elemanların yerine, linear bileşenleri ile nonlinear akım kaynaklarını paralel olarak koyabileceğimizi yukarıda belirtmiştik. Örnek olarak m tane nonlinear eleman bulunan bir devre düşünelim. Bu durumda devre için şöyle bir matrisel denklem sistemi kurabiliriz,

$$\begin{bmatrix} I_{1n} \\ I_{2n} \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1n} \\ V_{2n} \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{mn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_m \end{bmatrix} V_s \quad \begin{bmatrix} V_{1n} \\ V_{2n} \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1n} \\ H_{2n} \\ \cdot \\ \cdot \\ H_{mn} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Burada V_s giriş kaynağını göstermektedir. $n=1$ için nonlinear akım kaynakları vektörü sıfır alınırken, $n \geq 2$ için ise V_s sıfır alınır. n değıştikçe nonlinear akım kaynakları vektörü değışir. Bu değışim devreden devreye farklılık göstermez ve ilgili kitaplarda tablo halinde bulunabilir (Bu çalışmada da verilmiştir). A matrisinde ise n değıştikçe sadece ω yerine $\omega_1+\omega_2+\dots+\omega_n$ konularak değışiklik yapılır. Her n değeri için nonlinear elemanın uçları arasındaki gerilim yukarıdaki matrisel denklem sistemi yardımıyla bulunur. Bu gerilim ilgili elemanın n . derece nonlinearlik fonksiyonudur.

Eğer elemanın nonlinearliği $I=f(V)$ şeklinde tanımlanmışsa nonlinear akım kaynakları kullanılır. Nonlineerlik $V=f(I)$ şeklinde tanımlanırsa (linear bileşene seri) nonlinear gerilim kaynakları kullanılır. Bu durumda matrisel denklem sisteminde bir değışiklik olmaz sadece sonuç vektörüne nonlinear gerilim kaynağı ifadesi koyulur.

Kaynaklar

- [1] J. Bussgang, L. Ehrman, and J. Graham, "Analysis of nonlinear systems with multiple inputs," Proc. IEEE, Vol. 62, No 8, pp. 1088-1118, August 1974
- [2] L. O. Chua and C.-Y. Ng, "Frequency-domain analysis of nonlinear systems: general theory," IEE J. Electronic Circuits and Systems, Vol. 3, No.4, pp. 165-185, July 1979.
- [3] L. O. Chua and C.-Y. Ng, "Frequency-domain analysis of nonlinear systems: formulation of transfer functions," IEE J. Electronic Circuits and Systems, Vol. 3, No.6, pp. 257-269, November 1979.
- [4] Stephen A. Maas, *Nonlinear Microwave Circuits*, Norwood: Artech House, 1988
- [5] Piet Wambacq, Willy Sansen, *Distortion Analysis of Integrated Circuits*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998
- [6] R. A. Minasian, "Intermodulation Distortion Analysis of MESFET Amplifiers Using the Volterra Series Representation", IEEE Transactions on Theory and Techniques, Vol. MTT-28, No. 1, January 1980
- [7] C. L. Law, C. S. Aitchison, "Prediction of Wide-Band Power Performance of MESFET Distributed Amplifiers Using the Volterra Series Representation", IEEE Transactions on Theory and Techniques, Vol. MTT-34, No. 12, December 1986