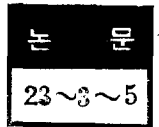


非線形抵抗(Resistive) 回路網의 解析

Analysis of Nonlinear Resistive Networks



車 均 鉉*
(Kyun Hyon Tchah)

Abstract

Computer is used to analyze nonlinear networks. Integrated circuits and new nonlinear elements have generated much interest in nonlinear circuit theory.

A key to the understanding and analysis of nonlinear circuits is the study of characteristics for nonlinear elements and nonlinear resistive networks both in theory and in computation.

In this paper, an iteration method using cut set analysis for nonlinear dc analysis based on Branin's method is described.

Application of this algorithm to solve two nonlinear problems is presented and a possible method of improving the basic algorithm by means of a sparse matrix technique is described.

1. 序 論

非線形連立方程式을 푸는 표준방법은 Newton-Raphson 反復 방법이다^{1),2)}. 이 방법은 2位로 빠르게 수렴하나 어떤 조건하에서는 발산하거나 解근처에서 진동한다. 그리고 連立方程式의 각 反復마다 Jacobian 行列을 反轉해야 하므로 이것이 계산시 많은 노력을 요한다. Broyden은 Newton-Raphson 방법을 수정하여 발산을 방지하고 각 反復마다 Jacobian 行列을 反轉하지 않는 경제적인 방법을 창안했다³⁾. Branin은 이 방법을 回路網에 도입하여 節點解析으로 이론을 전개했고 Jacobian 行列을 反轉하는 과정의 일부로서 Fibonacci search 방법을 택하였다. 본 論文에서는 이 Broyden 방법을 컷셋 해석을 이용하여 이론을 전개하고 Jacobian 行列의 反轉을 구하는 과정의 일부로서 채택한 Fibonacci search 대신에 골든섹션탐색(Golden section search)을 택하였다. 2절에서 컷셋 해석을 이용한 非線形抵抗回路網의 이론을 전개하고 3절에서 프로그래밍방법을 설명한다.

2. 컷셋해석을 이용한 非線形抵抗回路網의 理論展開

(a) Broyden 방법을 이용한 컷셋해석

컷셋行列 D 와 어드미턴스 行列 Y 를 이용하여 回路網에 대한 컷셋方程式은 다음과 같이 쓸 수 있다^{4),5)}.

$$D^t Y D e_r = D^t (I - Y E) \quad (1)$$

여기서 e_r 는 나무(木)의 가지電壓이고, I 는 電流源벡터이고, E 는 각 가지의 電壓源벡터이다. 그림 1과 같

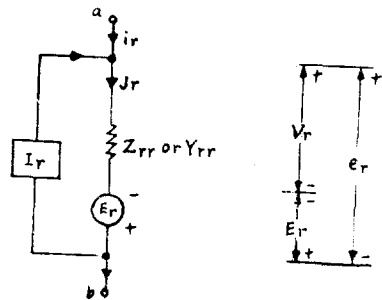


그림 1. 가지의 구성

Fig. 1. Component of the r th branch of an electrical network.

이 가지(branch)를 표시하면 素子양단의 電壓벡터 V 는

$$V = E + e \quad (2)$$

이다. 여기서 e 는 가지電壓벡터이며

$$e = D e_r \quad (3)$$

이다¹⁾.

(1)식을 다시 쓰면

$$f(e_r) = D^t [Y(D e_r + E) - I] = 0 \quad (4)$$

이 된다. (4)식에서 $f(e_r)$ 는 벡터변수 e_r 에 대한 벡터 함수이며 이것을 誤差벡터라 한다. 變分 $d e_r$ 에 대한 벡터 e_r 는 $d f$ 의 변화를 갖어올 것이므로

$$d f = \left(\frac{\partial f}{\partial e_r} \right) d e_r \quad (5)$$

*正會員: 樂田大 工大 助教授

이 된다. 여기서 $\frac{\partial f}{\partial e_T}$ 는 Jacobian 行列이며 이 行列의 ij 번째 要素(element)는

$$\left(\frac{\partial f}{\partial e_T}\right)_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial e_{Tj}} \quad (6)$$

이다. 여기서 f_i 는 $f(e_T)$ 벡터의 i 번째 要素이고 e_{Tj} 는 e_T 벡터의 j 번째 要素이다. (4)식의 解를 反復法을 이용하여서 푼다고 할 때 벡터解에 대한 k 번째 근사 $e_{T(k)}$ 에 해당하는 벡터函數 $f_{(k)}=f(e_{T(k)})$ 는 0이 아니다. (5)식에 의해 $e_{T(k)}$ 의 변화에 따라 $f_{(k)}$ 가 감소하여 0으로 되어야 한다. 그러므로 근사변화는

$$df_{(k)} = -f_{(k)} = \left(\frac{\partial f}{\partial e_T}\right)_{(k)} de_{T(k)} \quad (7)$$

이 되고, $(k+1)$ 번째 근사에서는 解벡터 e_T 는

$$e_{T(k+1)} = e_{T(k)} - \left(\frac{\partial f}{\partial e_T}\right)_{(k)}^{-1} f_{(k)} \quad (8)$$

이 된다. (8)식은 Newton-Raphson의 反復 공식이다. Jacobian 行列의 ij 번째 要素는 다음과 같이 구할 수 있다. 지금 $D_{.i}$ 를 켓셋 行列 D 의 i 번째 列(column)이라 한다. (4)식을 미분하면

$$\frac{\partial f_i}{\partial e_{Tj}} = (D_{.i})' \left[\frac{\partial Y(V)}{\partial e_{Tj}} (De_T + E) - Y(V) \frac{\partial (De_T + E)}{\partial e_{Tj}} \right] \quad (9)$$

이 된다.

(2)식에서 E 는 e_T 에 독립적이므로

$$\frac{\partial V_i}{\partial e_{Tj}} = \frac{\partial (De_T)_i}{\partial e_{Tj}} = \frac{\partial (D_{.i} \cdot e_T)}{\partial e_{Tj}} = d_{.ij} \quad (10)$$

이 된다. 여기서 $D_{.i}$ 는 D 의 i 번째 行(row)이고, $d_{.ij}$ 는 i 행의 j 번째 要素이다. 그러므로

$$\frac{\partial V}{\partial e_T} = D_{.j} \quad (11)$$

이 된다.

(10)식에서

$$\frac{\partial Y(V)}{\partial e_{Tj}} = \sum_{i=1}^b \frac{\partial Y}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial e_{Tj}} = \sum_{i=1}^b \frac{\partial Y}{\partial V_i} d_{.ij} \quad (12)$$

이 된다. 여기서 b 는 回路網의 가지의 數이다. 지금 回路網이 전부 非線形素子로 구성되어 있다면 가지電流는

$$\begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11}(V_1) & Y_{12}(V_2) & \dots & Y_{1b}(V_b) \\ Y_{21}(V_1) & Y_{22}(V_2) & \dots & Y_{2b}(V_b) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{b1}(V_1) & Y_{b2}(V_2) & \dots & Y_{bb}(V_b) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_b \end{pmatrix} \quad (13)$$

이 된다. 여기서 J 는 要素電流(element current)로서 $J = I + i$ 이다. $Y(V)$ 行列의 ij 번째 要素는

$$Y_{ij}(V_i) = \frac{J_i}{V_j}, \quad V_g = 0 \quad g \neq j \quad (14)$$

와 같이 정의된다.

(13)식에서

$$\frac{\partial Y}{\partial V_1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial Y_{11}}{\partial V_1} & 0 & \dots & 0_b \\ \frac{\partial Y_{21}}{\partial V_1} & 0 & \dots & 0_b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Y_{b1}}{\partial V_1} & 0 & \dots & 0_b \end{pmatrix} = \left[\left(\frac{\partial Y_{.1}}{\partial V_1} \right) (0) \dots (0_b) \right] \quad (15)$$

이 된다. 여기서 $Y_{.1}$ 은 $Y(V)$ 行列의 첫 列列이고 0_b 의 하첨자는 b 列을 나타낸다. 그러므로 (12)식과 (15)식에서

$$\frac{\partial Y(V)}{\partial e_{Tj}} = \left[d_{.1j} \left(\frac{\partial Y_{.1}}{\partial V_1} \right) d_{.2j} \left(\frac{\partial Y_{.2}}{\partial V_2} \right) \dots d_{.bj} \left(\frac{\partial Y_{.b}}{\partial V_b} \right) \right] \quad (16)$$

이 된다. (14)식의 정의를 이용하면

$$\frac{\partial Y_{ij}(V_j)}{\partial V_i} = \frac{\partial \left(\frac{J_i}{V_j} \right)}{\partial V_i} = \frac{\partial J_i}{\partial V_i} - \frac{J_i}{V_j^2} \quad (17)$$

이 된다. 그러므로 $\frac{\partial J_i}{\partial V_j} = Y_{ij}$ 라 놓고 ij 번째 微分元

드미탄스라 하면

$$\frac{\partial Y_{ij}(V_j)}{\partial V_i} = \frac{Y_{ij} - Y_{ij}}{V_j} \quad (18)$$

이 된다. 그러므로 (16)식과 (18)식을 이용하면

$$\frac{\partial Y(V)}{\partial e_{Tj}} (De_T + E) = \left[d_{.1j} \left(\frac{\partial Y_{.1}}{\partial V_1} \right) d_{.2j} \left(\frac{\partial Y_{.2}}{\partial V_2} \right) \dots d_{.bj} \left(\frac{\partial Y_{.b}}{\partial V_b} \right) \right] \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_b \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^b d_{.ij} (Y_{.i} - Y_{.i}) \quad (19)$$

이 된다. (19)식과 (9), (11)식을 결합하면

$$\frac{\partial f_i}{\partial e_{Tj}} = (D_{.i})' [(Y - Y) D_{.j} + Y D_{.j}] = (D_{.i})' Y D_{.j} \quad (20)$$

이 된다. 그러므로 Jacobian 行列은

$$\frac{\partial f}{\partial e_T} = D' Y D \quad (21)$$

이 된다. 따라서 (8)식은

$$e_{T(k+1)} = e_{T(k)} - (D' Y D)^{-1}_{(k)} f_{(k)} \quad (22)$$

이 된다. (22)식의 解를 구하기 위해서는 (4)식과 $Y(V)$ 외에 $Y(V)$ 를 각 反復마다 구해야 한다.

이런 번거로움을 피하기 위하여 Broyden의 非線形 微分方程式을 푸는 방법을 도입한다. 즉 (8)식에서 수 正 벡터

$$p_k = - \left(\frac{\partial f}{\partial e_T} \right)_k^{-1} f_k \quad (23)$$

을 정의하여 이 수 正 벡터의 일부를 취하면

$$e_{T(k+1)} = e_{T(k)} + t_{(k)} p_{(k)} \quad (24)$$

이 된다. 여기서 $t_{(k)}$ 는 誤差 벡터 f_{k+1} 의 길이를 최소화하기 위한 스카라양으로 이렇게 취하므로써 발산을 방지할 수 있다. 그러나 수렴이 보증되는 것은 아니다. t_k 를 취하는 방법으로서 골든섹션탐색(Golden section search) 방법을 이용하였다. 골든섹션탐색에서

$$t_k \triangleq \sum_{i=0}^k r^i \lambda_0 \quad i=0, 1, 2, \dots \quad (25)$$

이다. 여기서 $r=1,618$ 이고 λ_0 는 적당한 step-size이다.^{1,2)} 여기서 이 방법에 대한 자세한 설명은 하지 않겠으나 이 방법은 구간 $[0, 1]$ 을 연차적으로 미소 구간으로 나누어 (4)식의 결과에 따라 t 의 현재값의 좌우

로 최적치를 추적해 나가는 것이다. 골든섹손탐색을 택한 것은 Fibonacci 탐색보다 효율은 적으나 프로그래밍하기가 쉽고, (25)식을 택한 것은 0로부터 1까지 연속적으로 최적치 t_k 를 추적해 나갈 수 있기 때문이다.

(24)식의 벡터 e_T 가 스카라양 t 에 대한 連續函數다 하면

$$e_T(t) = e_{T(k)} + t p_{(k)} \quad (26)$$

이 되며 (4)식과 함께 誤差 벡터 $f(e_T)$ 가 역시 t 의 함수임을 나타낸다. Jacobian 行列이 존재한다고 가정 하였으므로

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{\partial f}{\partial e_T} \right) \frac{de_T}{dt} = \left(\frac{\partial f}{\partial e_T} \right) p_{(k)} \quad (27)$$

이 되고 (27)식은

$$p_{(k)} = \left(\frac{\partial f}{\partial e_T} \right)_k^{-1} \frac{df}{dt} = -H_k \frac{df}{dt} \quad (28)$$

와 같이 쓸 수 있다. Broyden은 $\frac{df}{dt}$ 를 階差(difference) 方程式으로 계산하였다. 즉 $f_{k+1} = f(t_k)$ 라 정하고 $f(t_k - s_k)$ 를 테일러級數로 전개하여 첫항만을 취하면

$$\frac{df}{dt} \sim \frac{f_{k+1} - f(t_k - s_k)}{s_k} = \frac{y_k}{s_k} \quad (29)$$

이 된다. 여기서 s_k 는 스카라양 t 의 미소증분을 취하고 y_k 는 誤差벡터 f 의 증분이다. (29)식에서

$$y_k = f_{k+1} - f_k \quad (30)$$

라 쓸 수 있고, (28)식과 (29)식을 결합하면

$$H_k \cdot y_k = -s_k \cdot p_k \quad (31)$$

가 된다. (31)식은 H_k 가 만족해야할 條件式이나 H_k 를 유일하게 정하지는 못한다. 그러므로 H_k 를 유일하게 정하기 위하여 Broyden은 다음 부대 조건을 가정하였다. 즉 p_k 와 다른 방향에서 e_T 의 변화에 의한 誤差벡터 f 의 변화에 대한 어떤 정보도 얻을 수 없으므로 p_k 에 Orthogonal한 방향으로 e_T 의 변화에 의한 f 의 변화는 없다고 본다. 이런 가정하에서 recursion 방정식은

$$H_{k+1} = H_k - \frac{(s_k p_k + H_k y_k) p_k^t H_k}{p_k^t H_k y_k} \quad (32)$$

이 된다^{1,2)}.

(32)식이 Jacobian 行列의 逆行列을 反轉하지 않고 직접 구하는 방법이다.

이상의 算法(algorithm)을 이용하여 非線形抵抗回路網의 解를 구하는 컴퓨터 flow chart는 그림 2와 같다.

(b) Sparse 行列을 이용하여 푸는 방법

이상의 算法을 Sparse 行列^{6,7,8)}을 이용하여 푸는 방법은 다음과 같다.

- ① 최초의 解벡터 e_{T1} 을 선정한다.
- ② $V_1 = D e_{T1} + E$
 $Y(V_1), I_{DN}(V_1)$

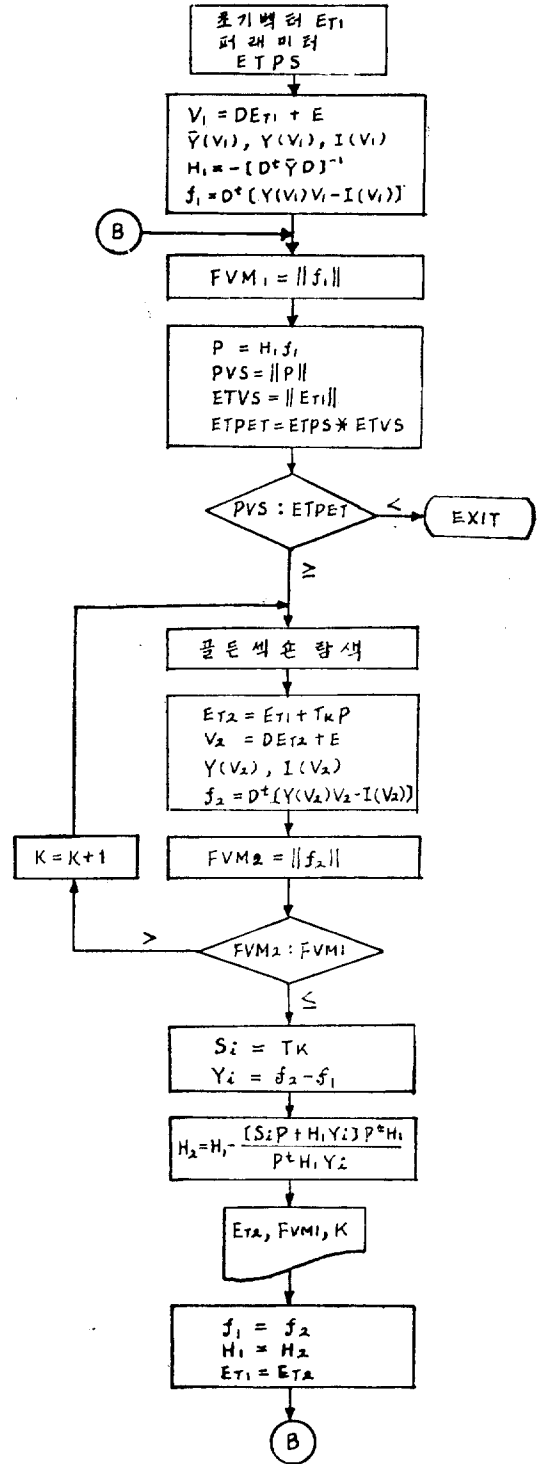


그림 2. 비선형 저항 회로망의 해를 위한 컴퓨터 흐름표

Fig. 2. Flow chart for solving nonlinear resistive network.

$$H_1 = D' Y D$$

$$f_1 = D' [Y(V_1)V_1 - I - I_{DN}(V_1)] \text{ 계산}$$

③ $\|f_1\|$ 계산

④ $(D' Y D)p = -f_1$ 을 Sparse 行列 방법을 이용하여 계산한다.

⑤ $\|p\|, \|e_{T1}\|$ 계산

⑥ $\|p\| < \epsilon \|e_{T1}\|$ 이면 出口

⑦ ⑥이 아니면 끝은색은탐색으로 최저치 t_k 를 구함.

$$e_{T2} = e_{T1} + t_k p$$

$$V_2 = D e_{T2} + E$$

$$Y(V_2), Y(V_2), I_{DN}(V_2)$$

$$f_2 = D' [Y(V_2)V_2 - I - I_{DN}(V_2)] \text{ 계산}$$

⑧ $\|f_2\|$ 계산

⑩ $\|f_2\| > \|f_1\|$ 이면 ⑦로 간다.

⑪ ⑩이 아니면 $e_{T1} = e_{T2}, f_1 = f_2$ 로 놓고 ③으로 간다.

여기서, $I_{DN}(V)$ 는 그림 4에 표시한 종속전류원이다. 회로해석 방법은 ① 閉路(mesh)解析 ② 節點解析 ③ 基本閉路(fundamental circuit)解析 ④ 컷셋解析 ⑤ 混合解析 ⑥ 狀態變數解析이 있는데 이 중 나무(tree)를 이용하여 풀 수 있는 것이 ③④⑤⑥이다. 混合解析은 임피던스回路網에 대해서는 基本閉路解析法에 의해 어드미턴스回路網에 대해서는 컷셋解析法에 의해 가지전류와 가지전압을 구하고, 狀態變數에 의한解析도 基本閉路和 컷셋解析을 이용하여 구하므로 節點解析보다 컷셋解析이 융통성이 있다. 그리고 회로망에 따라 나무가지의 수가 補木가지수보다 적게 나무를 선정하므로서 계산을 효율적으로 할 수 있다.

3. 프로그래밍

이상의 算法을 몇개의 샘플回路網을 예로 들어 프로그래밍 방법을 설명한다.

[예제 1] 그림 3과 같은 다이오드가 포함되어 있는 非線形回路網의 解를 구한다.

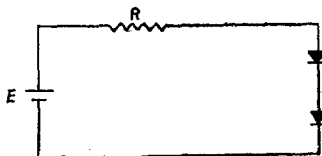


그림 3. 비선형 저항 회로망
Fig. 3. Nonlinear resistive network with diodes.

그림 3과 같은 回路에서 다이오드의 線形化 모델은 그림 4와 같이 취했다⁴⁾.

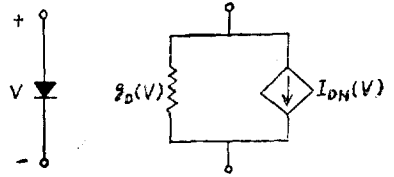


그림 4. 선형화 다이오드 모델
Fig. 4. Linearized diode model.

다이오드 電流는

$$I_D = I_S (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \tag{33}$$

과 같이 쓸 수 있다⁴⁾. 여기서 I_S 는 역방향 전류이고 V_T 는 열마늘다이오드는 0.026[V]이고 실리콘다이오드는 0.052[V]이다. I_{DN} 은 그림 5에서 구할 수 있다⁴⁾.

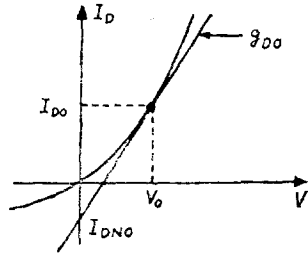


그림 5. 다이오드의 선형근사
Fig. 5. Linearized diode approximation.

그림 5에서

$$I_{DN0} = I_{D0} - g_{D0} V_0 \tag{34}$$

$$g_{D0} = \left. \frac{dI_D}{dV} \right|_{V=V_0} \tag{35}$$

이다. 그러므로

$$g_D(V) = \frac{I_S}{V_T} e^{\frac{V}{V_T}} \tag{36}$$

$$I_{DN}(V) = I_D(V) - g_D(V) V \tag{37}$$

이 된다.

그림 3의 방향성그래프를 구하면 그림 6과 같이 된다.

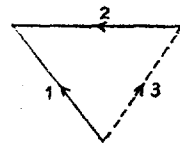


그림 6. 그림 3에 대한 방향성 그래프
Fig. 6. The oriented graph for the circuit of Fig. 3.

그림 6에서 실선은 나무이고 절선은 補木이다. 그림 6에 대한 컷셋行列은

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (38)$$

이 된다.

$Y(V)$ 와 $\bar{Y}(V)$ 는 각각

$$Y(V) = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & g_D(V_2) & 0 \\ 0 & 0 & g_D(V_3) \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$\bar{Y}(V) = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_1} & & 0 \\ (g_D(V_2) + \frac{\partial g_D(V_2)}{\partial V_2} \times V_2) & & \\ 0 & (g_D(V_3) + \frac{\partial g_D(V_3)}{\partial V_3} \times V_3) & \end{pmatrix} \quad (40)$$

이 된다. 그리고 $I = (0)$ 이고

$$I_{DN}(V) = \begin{pmatrix} C \\ I_{DN}(V_2) \\ I_{DN}(V_3) \end{pmatrix} \quad (41)$$

이다.

이상을 Broyden 방법을 이용한 컷셋해석과 Sparse 행렬을 이용한 컷셋해석으로 계산한 결과 각각 다음의 표 1, 표 2를 얻었다. 여기에는 각각 상이한 초기조건에 대한 결과가 실려 있다.

TABLE 1

TREE BRANCH AGE		ERROR	ITN
-0.6484 E 00	-0.4263 E 00	0.7059 E 00	1
-0.7713 E 00	-0.4782 E 00	0.1010 E 00	1
-0.7940 E 00	-0.4772 E 00	0.2712 E-01	1
-0.7938 E 00	-0.4676 E 00	0.1389 E-01	1
-0.7900 E 00	-0.3966 E 00	0.1206 E-01	1
-0.7936 E 00	-0.3970 E 00	0.2136 E-02	1
-0.7937 E 00	-0.3970 E 00	0.2161 E-03	1
-0.7938 E 00	-0.3969 E 00	0.4373 E-04	1
-0.7938 E 00	-0.3969 E 00	0.7337 E-06	1
-0.6666 E 00	-0.3333 E 00	0.5000 E 00	1
-0.7743 E 00	-0.3871 E 00	0.6955 E-01	1
-0.7934 E 00	-0.3967 E 00	0.1043 E-01	1
-0.7938 E 00	-0.3969 E 00	0.2340 E-03	1
-0.6182 E 00	-0.5595 E 00	0.1284 E 01	1
-0.7756 E 00	-0.6250 E 00	0.1818 E 00	1
-0.8083 E 00	-0.6178 E 00	0.6757 E 01	1
-0.8050 E 00	-0.5964 E 00	0.4058 E-01	1
-0.7692 E 00	-0.3977 E 00	0.3633 E-01	1
-0.7924 E 00	-0.4135 E 00	0.1446 E-01	1
-0.7918 E 00	-0.4022 E 00	0.3207 E-02	1
-0.7935 E 00	-0.3976 E 00	0.1734 E-02	1
-0.7938 E 00	-0.3969 E 00	0.2574 E-03	1

TABLE 2

TREE BRANCH VOLTAGE		ERROR	ITN
-0.7260E 00	-0.3950E 00	0.3085E 00	1
-0.7864E 00	-0.4139E 00	0.4060E-00	1
-0.7931E 00	-0.4101E 00	0.6376E-02	1
-0.7938E 00	-0.4058E 00	0.2345E-02	1
-0.7938E 00	-0.4028E 00	0.1405E-02	1
-0.7938E 00	-0.4008E 00	0.9127E-03	1
-0.7938E 00	-0.3994E 00	0.5998E-03	1
-0.6885E 00	-0.3770E 00	0.4520E 00	1
-0.7819E 00	-0.4120E 00	0.6186E-01	1
-0.7926E 00	-0.4101E 00	0.8676E-02	1
-0.7937E 00	-0.4059E 00	0.2554E-02	1
-0.7938E 00	-0.4029E 00	0.1443E-02	1
-0.7938E 00	-0.4008E 00	0.9300E-03	1
-0.7938E 00	-0.3995E 00	0.6104E-03	1

[예제 2] 그림 7과 같은 다이오드 브릿지 회로에 대한 해를 구한다.

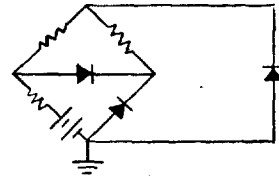


그림 7. 다이오드 브릿지 회로
Fig. 7. Diode bridge circuit.

그림 7에 대한 방향성 그래프는 그림 8과 같고 그림 8에 대한 컷셋행렬은

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (42)$$

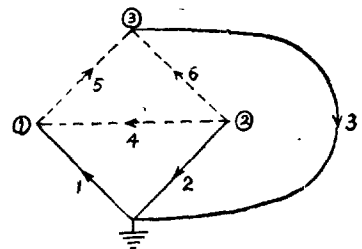


그림 8. 그림 7에 대한 방향성 그래프
Fig. 8. The oriented graph for the circuit of Fig 7.

이 된다.

Y(V)와 Y'(V)는 각각

$$Y = \begin{pmatrix} G_1 & & & & & & 0 \\ & g_2(V_2) & & & & & \\ & & g_3(V_3) & & & & \\ & & & g_4(V_4) & & & \\ 0 & & & & G_5 & & \\ & & & & & G_6 & \\ & & & & & & G_6 \end{pmatrix} \quad (43)$$

$$Y' = \begin{pmatrix} G_1 & & & & & & 0 \\ & \left(g_2(V_2) + \frac{\partial g_2(V_2)}{\partial V_2} V_2 \right) & & & & & \\ & & \left(g_3(V_3) + \frac{\partial g_3(V_3)}{\partial V_3} V_3 \right) & & & & \\ & & & \left(g_4(V_4) + \frac{\partial g_4(V_4)}{\partial V_4} V_4 \right) & & & \\ 0 & & & & G_5 & & \\ & & & & & G_6 & \\ & & & & & & G_6 \end{pmatrix} \quad (44)$$

이 된다. 그리고 I=(0)이고

$$I_{DN}(V) = \begin{pmatrix} 0 \\ I_{DN}(V_2) \\ I_{DN}(V_3) \\ I_{DN}(V_4) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (45)$$

이다.

(예제 2)에 대한 Broyden 방법을 이용한 컷셋해석 결과는 표 3과 같다.

TABLE 3

TREE BRANCH VOLTAGE			ERROR	ITN
0.2350E 00	-0.2350E 00	-0.2350E 00	0.2599E 00	2
0.1732E 00	-0.1732E 00	-0.1732E 00	0.2469E 00	2
0.1145E 00	-0.1145E 00	-0.1145E 00	0.2346E 00	2
0.5885E 01	-0.5885E 01	-0.5884E 01	0.2229E 00	2
0.5914E 02	-0.5913E 02	-0.5913E 02	0.2117E 00	2
-0.4438E 01	0.4438E 01	0.4438E 01	0.2011E 00	2
-0.9215E 01	0.9215E 01	0.9215E 01	0.1911E 00	2
-0.1375E 00	0.1375E 00	0.1375E 00	0.1815E 00	2
-0.1806E 00	0.1805E 00	0.1805E 00	0.1724E 00	2
-0.2214E 00	0.2211E 00	0.2212E 00	0.1638E 00	2
-0.2600E 00	0.2592E 00	0.2595E 00	0.1556E 00	2
-0.2962E 00	0.2942E 00	0.2949E 00	0.1478E 00	2
-0.3297E 00	0.3254E 00	0.3268E 00	0.1404E 00	2
-0.3602E 00	0.3516E 00	0.3544E 00	0.1334E 00	2
-0.3874E 00	0.3721E 00	0.3772E 00	0.1267E 00	2
-0.4115E 00	0.3874E 00	0.3951E 00	0.1204E 00	2
-0.4329E 00	0.3987E 00	0.4094E 00	0.1144E 00	2
-0.4523E 00	0.4071E 00	0.4210E 00	0.1087E 00	2
-0.4700E 00	0.4137E 00	0.4305E 00	0.1032E 00	2
-0.4862E 00	0.4190E 00	0.4386E 00	0.9812E-01	2
-0.5013E 00	0.4234E 00	0.4454E 00	0.9322E-01	2
-0.7822E 00	0.4956E 00	0.5645E 00	0.8856E-01	1
-0.6974E 00	0.3346E 00	0.3948E 00	0.7857E-01	1
-0.7287E 00	0.4061E 00	0.4575E 00	0.4703E-01	1
-0.7323E 00	0.4133E 00	0.4646E 00	0.3363E-01	2
-0.7343E 00	0.4172E 00	0.4687E 00	0.3105E-01	2
-0.7361E 00	0.4206E 00	0.4723E 00	0.2935E-01	2
-0.7682E 00	0.4804E 00	0.5364E 00	0.2779E-01	1
-0.7532E 00	0.4485E 00	0.5064E 00	0.2511E-01	1
-0.7562E 00	0.4570E 00	0.5125E 00	0.6917E-02	1
-0.7575E 00	0.4580E 00	0.5150E 00	0.1986E-02	1
-0.7572E 00	0.4588E 00	0.5144E 00	0.6767E-03	1

4. 結 論

1. Broyden 방법에 의한 컷셋解析方法과 프로그래밍을 제공하고, 골든섹손탐색의 프로그래밍을 제공했다.
2. 컷셋解析이 융통성이 있으므로 混合解析이나 狀態變數에 의한 解法에도 적용할 수 있다.
3. 非線形素子の 線形모델의 프로그래밍을 논했다. 끝으로 본 연구는 1973년도 문교부 연구조성비의 도움으로 이룩하였음을 밝힌다.

參 考 文 獻

- 1) Kuo & Magnuson, Computer Oriented Circuit Design, Prentice-Hall, Inc. 1969.
- 2) F.H. Branin, Jr, and H.H Wang, A Fast Reliable Iteration Method for dc Analysis of Nonlinear Networks, Proc. of the IEEE. Vol. 55, No. 11, pp. 1819~1826, Nov. 1967.
- 3) F.H Branin, Jr, Computer Methods of Network Analysis, Proc, of the IEEE. Vol 55, No. 11, p.1787. Nov. 1967.
- 4) W. J McCalla, and D. O. Pederson, Elements of Computer-Aided Circuit Analysis, IEEE

- Trans. on Circuit Theory, Vol. CT-18, No. 1, pp.14~26, Jan. 1971.
- 5) Stephen, W. Director, Survey of Circuit-Oriented Optimization Techniques, IEEE Trans. on Circuit Theory Vol. CT-18, No. 1, pp. 3~11, Jan. 1971.
- 6) 車均鉉, Sparse 매트릭스를 이용한 抵抗回路網의 解析과 電算프로그래밍, 電子工學會誌 예고중.
- 7) N. Sato and W.F. Tinney, Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance Matrix, IEEE, Power Apparatus and Systems, Vol. 82, pp.944~950, Dec. 1963.
- 8) W.F. Tinney and J.W. Walker, Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization, Proc. of the IEEE, Vol. 55, No. 11, pp.1801~1809, Nov. 1957.
- 9) F.B. Hildebrand, Introduction to Numerical Analysis, McGraw-Hill. 1956.
- 10) P. Henricci, Elements of Numerical Analysis, John Wiley & Sons, Inc. 1964.
- 12) D.J Wilde, Optimum Seeking Methods, Prentice-Hall, Inc. 1964.
- 13) C.A Desoer and E.S. Kuh, Basic Circuit Theory, McGraw-Hill, 1969.