

발전기-무한모선계통의 동태안정도 해석시 A행렬의 구조

권 세 혁* 송 길 영
고려대학교 전기공학과

On the Structure of A Matrix for Dynamic Stability
Analysis of One Machine to the Infinite Bus

Sae-Hyuk Kwon Kil-Yeong Song
Korea University

Abstract: The structure of A matrix of one machine connected to the infinite bus is described for a full model. The A matrix can be partitioned to submatrices which depend on the initial operating point and do not depend on it. When the dynamic properties for several different operating points are desired, those submatrices can be obtained through simple column operations. Furthermore, the elements of A matrix can be directly calculated from the manufacturer's data. RMS quantities of the state variables for the initial operating point are used. This approach can save the labor for calculating the elements of A matrix for the dynamic stability analysis.

1. 서 론

전력계통의 동태안정도(Dynamic Stability) 문제에서 발전기-무한모선계통의 모델링은 가장 기본적인 문제이다. 동태안정도 문제에서는 비선형미분방정식을 초기동작점에 대하여 미소신호선형화하여 식(1)과 같은 선형미분방정식을 얻고, A행렬의 고유치(Eigenvalue)를 구하여 계통의 안정성 및 진동특성을 파악하고 있다.

$$\dot{X} = A(X_0)X + B(X_0)U$$

식(1)은 발전기-무한모선계통의 전압방정식(Voltage Equation)과 동요방정식(Swing Equation)을 다 포함한 것이다. 발전기를 상세모델(Full Model)로 나타낼 경우 상태변수 X는 식(2)와 같이 각 권선의 전류로 잡거나, 또는 자속쇄고수(Flux-Linkage)로 잡을 수도 있다.

$$X = [i_d, i_F, i_D, i_q, i_Q, \omega, \delta]^t \quad (2.1)$$

$$X = [\lambda_d, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_q, \lambda_Q, \omega, \delta]^t \quad (2.2)$$

식(2)에서 첨자 "F"는 계자권선을, 첨자 "D"는 d축 제동권선(Damper Winding)을, 첨자 "Q"는 q축 제동권선을 나타낸다. 본 연구에서는 전류모델 또는 자속쇄고수모델에 입각한 A행렬 각 원소들 간의 상호연관성을 규명하고, 발전기계통 제작회사(Manufacturer)가 공급한 데이터로부터 직접적으로 A행렬의 각 원소를 구할수 있는 방법을 제시한다. 우선 여자계통(Excitation System), 속도조절계통(Speed Governing System) 및 전력계통안정기(Power System Stabilizer : PSS)가 없는 발전기만의 행렬의 구조를 전류모델 및 자속쇄고수모델에 대하여 제시하고, 직접계산공식을 유도하였다.

2. 문제의 정식화

그림1은 동기발전기(Synchronous Machine)의 고정자 a, b, c 권선과 회전자의 F, D, Q 권선을 나타낸 것이다. 여기서 제동권선의 인가전압은 없으므로 v_D 및 v_Q 는 각각 영이다. a, b, c 변수를 파크변환에 의하여 각각 d, q 변수로 변환한 경우의 전압방정식은 식(3)과 같이 표현된다[1]. 모든 단위는 P.U. 화 되었다고 가정한다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_F \\ v_D \\ v_q \\ v_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & & \\ & 0 & r_F & 0 & \\ & 0 & 0 & r_D & \\ & & & & r & 0 \\ & & & & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega \lambda_q \\ 0 \\ 0 \\ \omega \lambda_d \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_q \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)의 전압방정식은 전류 i 및 자속 쇄고수 λ 가 혼합되어 있는 형태이다. 만약 자속 쇄고수를 전류로 치환하면 우변은 전류만으로 표현될 것이고, 전류를 자속 쇄고수로 치환한 경우는 자속 쇄고수만으로 표현할 수 있다. 자속 쇄고수와 전류간에는 식(4)와 같은 관계가 성립된다[1]. 여기서 $k = \sqrt{3/2}$ 이다.

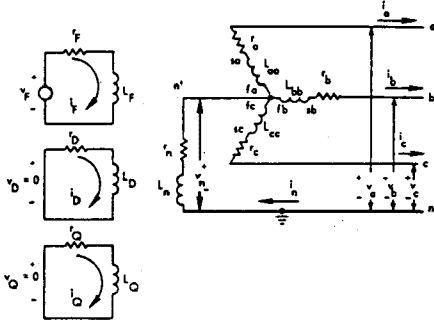


그림 1. 동기기 내부권선의 개념도

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_q \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & KM_F & KM_D & 0 & 0 \\ KM_F & L_F & M_R & 0 & 0 \\ KM_D & M_R & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & KM_Q \\ 0 & 0 & 0 & KM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (4)$$

단, L_d : 직축 리액턴스
 L_q : 횡축 리액턴스

계통 방정식을 정규화함에 있어서 기본단위(Base Quantity)를 잡는 데는 여러가지 선택을 할 수 있겠으나 동상호 자속 쇄고수(Equal Mutual Flux Linkages)의 개념에 입각하면 식(4)의 비데카요 소들은 다음과 같다.

$$L_{AD} = KM_F = KM_D = M_R = L_d - 1_d$$

$$L_{AQ} = KM_Q = L_q - 1_q$$

여기서 $1_d = 1_q = x_1$ (누설 리액턴스)

계통의 동요 방정식은 식(6)과 같은 미분방정식으로 표현된다.

$$(2H/\omega_R) \dot{\omega} + D\omega = T_m - T_e$$

$$= T_m - (i_q \lambda_d - i_d \lambda_q) \quad (6)$$

$$\dot{\delta} = \omega$$

단 H: 발전기의 관성정수 (sec)

ω_R : 377 (rad/sec) (60Hz 계통에서)

D: 계통 계수

T_m : 기계적입력

T_e : 전기적출력

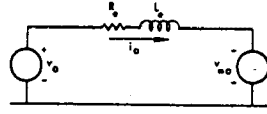


그림 2. 발전기 - 무한모선 계통

식(3) 및 식(6)의 전압방정식 및 동요 방정식을 함께 고려하면 계통 방정식이 된다. 발전기가 그림 2와 같이 저항이 R_e , 그리고 인덕턴스가 L_e 인 송전선을 통하여 무한모선에 연결되어 있다고 할 때 발전기 단자전압 v_d 및 v_q 와 무한모선전압 $v_{\infty d}$ 및 $v_{\infty q}$ 사이에는 식(7)과 같은 관계가 성립된다[1].

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\infty d} \\ v_{\infty q} \end{bmatrix} + R_e \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_e \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} + \omega L_e \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$\begin{bmatrix} v_{\infty d} \\ v_{\infty q} \end{bmatrix} = \sqrt{3} V_{\infty} \begin{bmatrix} -\sin(\delta - \alpha) \\ \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix}$$

단 V_{∞} : 무한모선 상전압의 실효치

δ : 발전기 위상각

α : 무한모선 위상각

식(7)로 식(3)의 전압방정식에 있는 v_d 및 v_q 를 각각 치환하면 발전기가 송전선을 통하여 무한모선에 연결된 경우의 전압방정식이 된다. 계통 방정식에 존재하고 있는 전류 i 및 자속 쇄고수 λ 를 어느한쪽으로 통일할 경우 식(4)의 인덕턴스 행렬(Inductance Matrix)의 역행렬을 구하여야 한다. 인덕턴스 행렬의 각 요소는 발전기 공급회사의 데이터로 부러 얻을 수 있으며 직접 얻을 수 없을 경우에는 얻을 수 있는 데이터로 부러 계산하여야 한다. 용량 L_F , L_D 및 L_Q 는 데이터로 직접 주어지지 않으므로 계산하여야 한다. 인덕턴스 행렬의 역행렬을 다음과 같이 정의한다.

$$D = \begin{bmatrix} L_d & L_{AD} & L_{AD} \\ L_{AD} & L_F & L_{AD} \\ L_{AD} & L_{AD} & L_D \end{bmatrix}^{-1} \quad (8)$$

$$Q = \begin{bmatrix} L_Q & L_{AQ} \\ L_{AQ} & L_Q \end{bmatrix}^{-1}$$

그리고 \hat{D} 는 식(8)에서 L_d 를 $\hat{L}_d (=L_d+L_e)$ 로 치환한 경우의 역행렬을 나타내고, \hat{Q} 는 역시 L_Q 를 $\hat{L}_Q (=L_Q+L_e)$ 로 치환한 경우의 역행렬을 나타낸다. 각 역행렬의 (i, j)번째 원소는 각각 D_{ij} , Q_{ij} , \hat{D}_{ij} 및 \hat{Q}_{ij} 로 표기하기로 한다. 초기동작점(첨자 "0"로 표시함)에 대하여 식(3), (6) 및 (7)의 계통방정식을 선형화하여 식(1)의 A행렬과 BU행렬을 전류모델 및 자속 쇄수 모델에 대하여 유도한 것이 각각 식(9) 및 (10)이다. 여기서 $\tau_j = 2H\omega_R$ 이며 $\hat{x} = x + x_e$ 이다. 여기서 전류모델인 경우 상태변수를 식(11.1)과 같이 각 전류의 실효치로 잡고, 자속 쇄수모델인 경우 상태변수를 식(11.2)와 같이 각 자속 쇄수치의 실효치로 잡았다.

전류 모델

$$x = [i_d, i_F, i_D, i_Q, i_D, \omega, \delta]^t \quad (11.1)$$

$$\text{단 } [i_d, i_F, i_D, i_Q, i_D] = (1/\sqrt{3}) [i_d, i_F, i_D, i_Q, i_Q]$$

자속 쇄수 모델

$$x = [\lambda_d, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_Q, \lambda_Q, \omega, \delta]^t \quad (11.2)$$

$$\text{단 } [\lambda_d, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_Q, \lambda_Q] = (1/\sqrt{3}) [\lambda_d, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_Q, \lambda_Q]$$

$$[v_{\infty do}, v_{\infty qo}] = (1/\sqrt{3}) [v_{\infty do}, v_{\infty qo}] \quad (11.3)$$

전류 모델

$$A = \begin{bmatrix} -\hat{D}_{11} & -r_F \hat{D}_{12} & -r_D \hat{D}_{13} & -\omega \hat{L}_{d11} & -\omega \hat{L}_{AD11} & -L_{d11} \hat{I}_{qo} & \hat{D}_{11} v_{\infty qo} \\ -\hat{D}_{21} & -r_F \hat{D}_{22} & -r_D \hat{D}_{23} & -\omega \hat{L}_{q21} & -\omega \hat{L}_{AQ21} & -L_{d21} \hat{I}_{qo} & \hat{D}_{21} v_{\infty qo} \\ -\hat{D}_{31} & -r_F \hat{D}_{32} & -r_D \hat{D}_{33} & -\omega \hat{L}_{q31} & -\omega \hat{L}_{AQ31} & -L_{d31} \hat{I}_{qo} & \hat{D}_{31} v_{\infty qo} \\ \omega \hat{L}_{d11} & \omega \hat{L}_{AD11} & \omega \hat{L}_{AD11} & -\hat{Q}_{11} & -r_Q \hat{Q}_{22} & -L_{d11} \hat{I}_{do} & -\hat{D}_{11} v_{\infty do} \\ \omega \hat{L}_{q21} & \omega \hat{L}_{AQ21} & \omega \hat{L}_{AQ21} & -\hat{Q}_{21} & -r_Q \hat{Q}_{22} & -L_{d21} \hat{I}_{do} & -\hat{D}_{21} v_{\infty do} \\ (L_q - L_d) \hat{I}_{qo} & -L_{AD} \hat{I}_{qo} & -L_{AD} \hat{I}_{qo} & L_{q do} - \hat{L}_{do} & L_{AQ} \hat{I}_{do} & -D & 0 \\ r_j & r_j & r_j & r_j & r_j & r_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$BU = [\hat{D}_{12} v_F, \hat{D}_{22} v_F, \hat{D}_{32} v_F, 0, 0, \tau_m / r_j, 0]^t$$

$$\text{단 } v_F = (1/\sqrt{3}) v_F$$

$$\hat{L}_{do} = L_{do} + L_e$$

자속 쇄수 모델

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & -\omega \hat{D}'_{11} (Q'_{11})^{-1} - \omega \hat{L}_e \hat{D}'_{11} Q'_{12} & a_{16} & \hat{D}'_{11} v_{\infty qo} \\ -r_F \hat{D}'_{21} & -r_F \hat{D}'_{22} & -r_F \hat{D}'_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -r_D \hat{D}'_{31} & -r_D \hat{D}'_{32} & -r_D \hat{D}'_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \omega \hat{Q}'_{11} (\hat{D}'_{11})^{-1} - \omega \hat{L}_e \hat{Q}'_{11} \hat{D}'_{12} & \omega \hat{L}_e \hat{Q}'_{11} \hat{D}'_{12} & \omega \hat{L}_e \hat{Q}'_{11} \hat{D}'_{13} & a_{44} & a_{45} & a_{46} - \hat{Q}'_{11} v_{\infty do} \\ 0 & 0 & 0 & -r_Q \hat{Q}'_{21} & -r_Q \hat{Q}'_{22} & 0 \\ (D_{11} L_q - 1) \hat{I}_{qo} & L_{d12} \hat{I}_{qo} & L_{d13} \hat{I}_{qo} & \hat{I}_{do} - \hat{Q}'_{11} \hat{I}_{do} & -\hat{Q}'_{12} \hat{I}_{do} & -D & 0 \\ r_j & r_j & r_j & r_j & r_j & r_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$BU = [-L_e \hat{D}'_{11} \hat{D}'_{12} v_F, v_F, 0, 0, 0, \tau_m / r_j, 0]^t$$

식(10)의 원소들은 다음과 같이 유도된다.

$$[a_{11}, a_{12}, a_{13}] = -\hat{r}_D \hat{D}'_{11} [D_{11}, D_{12}, D_{13}]$$

$$-L_e \hat{D}'_{11} \hat{D}'_{12} [a_{21}, a_{22}, a_{23}]$$

$$-L_e \hat{D}'_{11} \hat{D}'_{13} [a_{31}, a_{32}, a_{33}]$$

$$[a_{44}, a_{45}] = -\hat{r}_Q \hat{Q}'_{11} [Q_{11}, Q_{12}]$$

$$+L_e \hat{Q}'_{11} \hat{Q}'_{12} [a_{54}, a_{55}]$$

$$a_{16} = -\hat{D}'_{11} \hat{L}_Q \hat{I}_{qo}$$

$$a_{46} = \hat{Q}'_{11} \hat{L}_{do}$$

$$\text{여기서 } \hat{L}_{qo} = L_{qo} + L_e \hat{I}_{do}$$

$$\hat{D}'_{11} = (1 + L_e \hat{D}_{11})^{-1}$$

$$\hat{Q}'_{11} = (1 + L_e \hat{Q}_{11})^{-1}$$

식(9) 및 식(10)의 행렬을 다음과 같은 부분행렬로 구분하여 각 원소의 관계를 관찰하면 다음과 같다. 여기서 초기동작점의 각속도(p.u.) ω_0 는 1 p.u.이다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

1. 두 모델의 경우 모두 부분행렬 A_{33} 는 발전기정수 (τ_j 및 D)에만 관계가 있다.
2. 두 모델 모두 부분행렬 A_{11} , A_{12} , A_{21} , 및 A_{22} 는 발전기 및 송전선 정수에만 관계가 있으며 상태변수의 초기치와는 무관하다. 따라서 송전선정수가 고정이면 여러개의 서로 다른 초기동작점에 대해서 이들 부분행렬은 불변이다.
3. 두 모델 모두 부분행렬 A_{13} , A_{23} , A_{31} , 및 A_{32} 는 발전기정수, 송전선 정수 및 초기동작점에 의하여 결정된다. 즉 발전기 및 송전선정수가 고정이면 여러개

표1. 전류모델의 경우 부분행렬원소

부분행렬원소		기호행표현
A ₁₁	*11	$-\hat{L}_d^{-1}$
	*21	$-\hat{a}_{11}(L_d^{-1}L'_dL'AD^{-1}L_{AD}^{-1})$
	*31	$-\hat{a}_{11}(L'_dL'_d)L'AD^{-1}$
	*12	$\hat{L}_d^{-1}\tau_{do}^{-1}L'AD^{-1}L_{AD}L'AD$
	*22	$-\hat{a}_{32}\hat{L}_d^{-1}L'_q\tau_{do}^{-1}L'AD^{-1}L'AD$
	*32	$-\hat{L}_d^{-1}\hat{L}_d^{-1}\tau_{do}^{-1}L'AD^{-2}L_{AD}(L'_dL'_d)$
	*13	$\hat{L}_d^{-1}\tau_{do}^{-1}L'AD$
A ₂₂	*44	$-\hat{L}_q^{-1}$
	*54	$-\hat{a}_{44}(L_q^{-1}L'_qL'_{AQ}^{-1})$
	*45	$\hat{L}_q^{-1}\tau_{qo}^{-1}L'_{AQ}$
	*55	$-\hat{L}_q^{-1}L'_q\tau_{qo}^{-1}$
A ₁₂	*14	$-\hat{L}_q^{-1}$
	*24	$\hat{L}_q^{-1}\hat{a}_{21}$
	*34	$\hat{L}_q^{-1}\hat{a}_{31}$
A ₂₃	*15	$-\hat{L}'_{AQ}^{-1}$
	*25	\hat{L}'_{AQ}^{-1}
	*35	\hat{L}'_{AQ}^{-1}
A ₃₁	*41	\hat{L}_d^{-1}
	*51	$-\hat{L}_d^{-1}(L_q^{-1}L'_qL'_{AQ}^{-1})$

* $\hat{L}_d^{-1} = L_d^{-1} + L_e$

부분행렬원소		기호행표현
A ₂₁	*42	\hat{L}'_{AD}^{-1}
	*52	$-\hat{L}'_{AD}^{-1}(L_q^{-1}L'_qL'_{AQ}^{-1})L_{AD}$
	*43	\hat{L}'_{AD}^{-1}
A ₁₃	*16	$-\hat{D}_{11}^{-1}$
	*26	$-\hat{D}_{21}^{-1}$
	*36	$-\hat{D}_{31}^{-1}$
A ₂₃	*46	\hat{L}_{do}^{-1}
	*56	$-\hat{L}_{do}^{-1}(L_q^{-1}L'_qL'_{AQ}^{-1})$
	*47	$-\hat{V}_{do}^{-1}$
A ₃₁	*61	$\tau_j^{-1}(L_q^{-1}L'_q)$
	*62	$-\tau_j^{-1}L'_{AD}$
	*64	$\tau_j^{-1}(L_{do}^{-1}L'_q)$
A ₃₂	*65	$\tau_j^{-1}L'_{AQ}$

표2. 자속해교수 모델의 경우 부분행렬 원소

부분행렬원소		기호행표현
A ₁₁	*11	$-\hat{L}_d^{-1}K_1(\hat{a}_{42}\hat{a}_{21}^* + \hat{a}_{33}\hat{a}_{31}^*)$
	*12	$\hat{L}_d^{-1}(L_d^{-1}L'_dL'AD^{-1}L_{AD}^{-1})$
	*13	$\hat{L}_d^{-1}(L'_dL'_d)L'AD^{-1}$
	*21	$(\tau_{do}^{-1}L'_dL'AD^{-1})L'_{AD}L'AD$
	*22	$-(\tau_{do}^{-1}L'_dL'AD^{-1})L'_dL'AD^{-1}$
	*23	$(\tau_{do}^{-1}L'_dL'AD^{-1})L'AD^{-1}(L'_dL'_d)$
	*31	$(\tau_{do}^{-1}L'_dL'AD^{-1})L'AD^{-1}$
A ₂₂	*44	$-\hat{L}_q^{-1}$
	*45	$\hat{L}_q^{-1}(L_q^{-1}L'_qL'_{AQ}^{-1})$
	*55	$-\hat{L}_q^{-1}$

* $K_1 = L_d^{-1}L'_qL'_q^{-1}$

부분행렬원소		기호행표현
A ₁₂	*14	$-\hat{D}'_{11}^{-1}$
	*15	$-\hat{L}'_{do}^{-1}$
A ₂₁	*41	\hat{Q}'_{11}^{-1}
	*42	\hat{L}'_{do}^{-1}
A ₁₃	*16	$-\hat{D}'_{11}^{-1}$
	*17	\hat{D}'_{11}^{-1}
A ₂₃	*46	\hat{Q}'_{11}^{-1}
	*47	$-\hat{Q}'_{11}^{-1}$
A ₃₁	*61	$\tau_j^{-1}(D_{11}^{-1})^{-1}$
	*62	$\tau_j^{-1}L'_q$
A ₃₂	*63	$\tau_j^{-1}L'_q$
	*64	$\tau_j^{-1}(L_{do}^{-1}L'_q)$
A ₃₂	*65	$-\tau_j^{-1}(Q_{12}^{-1}L'_{AQ})$

의 서로 다른 동작점에 대하여 행렬을 구성할 경우 이들 부분행렬만 재계산하면 된다.

4. 전류모델의 경우 A_{12} 및 A_{13} 의 각 열은 A_{11} 의 첫번째 열과 일치종속이다. 또한 A_{21} 및 A_{23} 의 각 열은 A_{22} 의 첫번째 열과 일치종속이다. 다시말해서 A_{12} 및 A_{13} 의 각 열은 $[\hat{D}_{11}, \hat{D}_{21}, \hat{D}_{31}]^t$ 에 적절한 계수를 곱하여 계산할 수 있고, A_{21} 및 A_{23} 의 각 열은 $[\hat{Q}_{11}, \hat{Q}_{21}]^t$ 에 적절한 계수를 곱하여 계산할 수 있다.

5. 자속최고수 모델의 경우 부분행렬 A_{11} 의 둘째 및 셋째 행은 발전기 정수에만 관계된다. A_{22} 의 둘째행도 발전기 정수에만 관계된다.

6. 초기동작점에 관련된 부분행렬 $A_{13}, A_{23}, A_{31}, A_{32}$ 의 모든 원소는 초기치 $I_{do}, I_{qo}, \Lambda_{do}, \hat{\Lambda}_{do}, v_{\infty do}$ 및 $v_{\infty qo}$ (실효치)만 알면 계산할 수 있다.

식(9) 및 식(10)으로 표시된 계통의 A행렬은 각 원소들의 상호관련성을 관찰하기에는 편리한 형태이나, 실제 계산에 있어서는 불편하다. 왜냐하면 저항 $r_F, r_D,$ 및 r_Q 등을 알아야만 계산이 가능한데 이들은 제작회사 데이터로 직접 주어지지 않으며 이들 데이터로부터 역산을 하여야 한다. A행렬의 원소를 이러한 역산 과정없이 직접 계산할 수 있는 공식을 유도하여 표1 및 표2에 제시하였다.

3. 결 론

표1 및 표2에 제시한 공식으로 A행렬의 모든 원소를 직접적으로 계산하는 것이 가능하며 여러개의 서로 다른 초기동작점에 대하여 A행렬을 계산할 경우는 초기동작점에 관계된 부분행렬만을 재계산하면되므로 계산에 필요한 노력이 단축된다.

4. 참고 문헌

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad, Power System Control and Stability, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [2] 권세혁, "발전기-무한모선 계통의 계통행렬구조에 관한 연구", 고려대학교 공과대학 공학논문집(28집), pp.63-70, 1987.