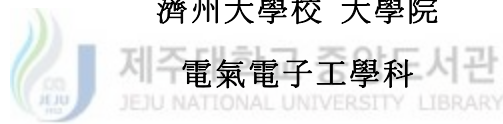


碩 士 學 位 論 文

狀 態 方 程 式 에 의 한 自 己 勵 磁
誘 導 發 電 機 의 過 渡 電 壓 特 性



金 度 進

2002年 12月

狀態方程式에 의한 自己勵磁 誘導發電機의 過渡電壓特性

指導教授 左 宗 根

金 度 進

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



2002年 12月

金度進의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2002年 12月

Transient Voltage Characteristics of Self-excited Induction Generator by State Equation

Do-Jin kim

(Supervised by professor Chong-Keun Jwa)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2002年 12月

목 차

LIST OF FIGURES	i
SUMMARY	ii
I. 서 론	1
II. 유도발전기 모델	3
1. 전압방정식	3
2. 정지좌표계에서의 등가회로와 토오크	8
3. 상태변수 해석	11
III 해석결과 및 검토	19
IV. 결 론	22
참고문헌	23

LIST OF FIGURES

- Fig. 1 Two-pole, 3-phase symmetrical induction generator ————— 3
- Fig. 2 D-q axis equivalent circuits with R-L load induction
generator in the stationary reference frame ————— 9
- Fig. 3 Q axis equivalent circuit and network graph with R load — 12
- Fig. 4 Q axis equivalent circuit and network graph with R-L load — 15
- Fig. 5 Analyzed transient voltage characteristics ————— 20



SUMMARY

The transient voltage characteristics of capacitor self-excited induction generator are analyzed by the state equation which is obtained from the d-q axis equivalent circuit of stationary reference frame and torque equation. The d-q equivalent circuit is composed using the condition of stationary reference frame. The mutual inductance is only considered as a function of magnetizing current in the equivalent circuit. The characteristics are analyzed and discussed by the backward Euler method for various load conditions under specified initial conditions and input.



I. 서 론

1935년 이래 커패시터 자기여자 유도발전기에 대한 많은 연구가 되어오고 있다(Basset and Potter, 1935). 또한 근래에 대두되고 있는 에너지 자원고갈에 대비하여 대체에너지원으로서 풍력이나 소수력발전기로서 유도발전기가 널리 사용되고 있다. 유도발전기는 유지비의 저렴, 과도특성의 향상, 직류여자 전원의 불필요, 그리고 농형에서는 브러시가 없는 구조 등 동기발전기에 비교하여 많은 장점들을 가지고 있다. 이에 따라 자기여자 유도발전기에 대한 정상상태의 대표적인 해석으로는 Murthy(1982) 등에 의한 루우프 임피던스법과 Quazen과 Mcpherson(1983)에 의한 절점 어드미턴스법이 있으나 이들은 모두 IEEE 권장 T형 등가회로를 사용하고 있다. Grantham(1989) 등은 정상상태 해석에 T형 등가회로를 사용해서 여자회로의 포화와 회전자 회로 정수의 주파수에 따른 변화를 고려하였고 과도 상태해석에는 일반화된 기계이론에 기초한 d-q축 모델을 사용하여 과도전압과 부하변화에 따른 단자전압과 전류변화를 해석하였다.

과도상태 해석으로 Wang과 Su(1999)는 임의속도 좌표계에서의 d-q축 모델을 사용하여 무부하, 저항부하, 유도성부하, 그리고 용량성부하들에 대한 발전기의 순시접속시와 차단시의 단자전압과 자화리액턴스의 변화를 분석하였다. Wang과 Lee(1997)는 정지좌표계에서의 d-q축 모델을 사용하여 고유치와 고유치 감도해석에 기초한 자기여자 유도발전기의 최소와 최대 커패시턴스의 예측방법과 다양한 부하에 대한 과도해석을 하였다. 그러나 위의 과도상태해석에는 부하종류에 따른 과도초기전압의 변화는 해석되어 있지 않고 변수의 초기값과 입력토크에 의한 영향이 명확하지 않다.

본 논문에서는 이들을 고려해서 해석하기 위하여 정지좌표계에서의 d-q축 등가회로를 사용하고 이 등가회로로부터 상태방정식을 구성하여 토크식과

결합해서 부하종류에 따른 과도전압 특성을 해석하였다.



II. 유도 발전기 모델

1. 전압방정식

Fig. 1은 2극 3상의 대칭 유도발전기의 권선배치, 전류의방향, 그리고 a상 권선의 고정자와 회전자의 자기축을 보이고 있다. 고정자와 회전자 1상의 권선 저항을 각각 r_s 와 r_r , 권선사이의 자속쇄교수를 λ 라 하고 $p = \frac{d}{dt}$ 로 놓으면 전압방정식은 다음과 같다.

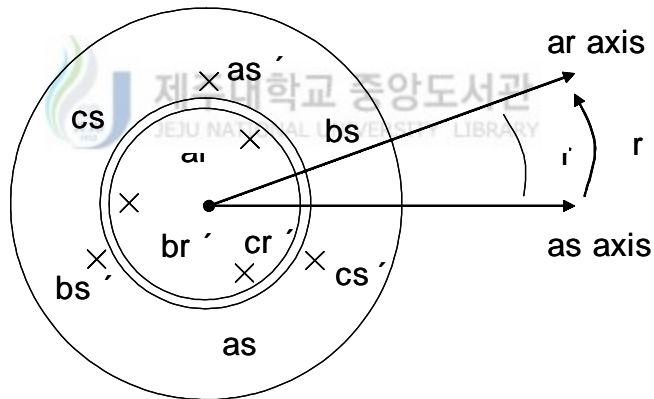


Fig. 1 Two-pole, 3-phase symmetrical induction generator

$$V_{abc} = -r_s i_{abc} + p\lambda_{abc} \quad (1)$$

$$V_{abc} = r_r i_{abc} + p\lambda_{abc} \quad (2)$$

여기서

$$(f_{abc})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (3)$$

$$(f_{abc})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}] \quad (4)$$

이다. 위 식에서 f 는 전압, 전류, 또는 자속쇄교수를 대표하고 하첨자 s 와 r 은 각각 고정자와 회전자회로에 관계된 정수와 변수를 나타낸다. 또한 r_s 와 r_r 은 영이 아닌 요소를 갖는 대각행렬이며 상첨자 T 는 전치 행렬을 표시한다.

선형자기시스템에서는

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abc} \\ i_{abc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

이고, 회전자측 변수와 정수들을 고정자측으로 환산하면 다음과 같다.

$$V'_{abc} = \frac{N_s}{N_r} V_{abc} \quad (6)$$

$$i'_{abc} = \frac{N_r}{N_s} i_{abc} \quad (7)$$

$$\lambda'_{abc} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abc} \quad (8)$$

$$L'_{rr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_r \quad (9)$$

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (10)$$

$$r'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 r_r \quad (11)$$

이들 식에서 N_s 와 N_r 은 각각 1상의 고정자와 회전자의 등가 권수이고 이 관계식을 사용하면 (5)식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abc r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs} \\ i'_{abc r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3상 변수들을 임의속도 좌표계의 dqo 변수로 변환은 다음과 같이 한다.

$$f_{qdos} = K_s f_{abcs} \quad (13)$$



여기서,

$$(f_{qdos})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{os}] \quad (14)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\zeta) d\zeta + \theta(0) \quad (16)$$

이고, ω 는 임의속도 좌표계의 각속도이고 ζ 는 적분의 가변수이다.

이 변환을 (1), (2)식에 적용하면 변환된 전압방정식은

$$V_{qdos} = -r_s i_{qdos} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qdos} \quad (17)$$

$$V'_{qdor} = r'_r i'_{qdor} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqr} + p \lambda'_{qdor} \quad (18)$$

이 되고, 여기서

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs} \quad 0] \quad (19)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} \quad -\lambda'_{qr} \quad 0] \quad (20)$$

이 된다.

(12)식을 변환하면 변환된 쇄교자속수는

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qdos} \\ \lambda'_{qdor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} \\ K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & K_r L'_r (K_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qdos} \\ i'_{qdor} \end{bmatrix} \quad (21)$$

이 되고, 여기서

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \beta & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (23)$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\zeta) d\zeta + \theta_r(0) \quad (24)$$

이다. 상첨자 -1은 역행렬을 표시하고 ω_r 은 회전자의 각속도이다.

임의속도 좌표계의 dqo 변수로 변환된 (17), (18)식은

$$\begin{aligned} v_{qs} &= -r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \\ v_{ds} &= -r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \\ v_{os} &= -r_s i_{os} + p \lambda_{os} \\ v'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \\ v'_{dr} &= r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \\ v'_{0r} &= r'_r i'_{0r} + p \lambda'_{0r} \end{aligned} \quad (25)$$



이고, 변환된 자속 쇄교수는 다음과 같다.


$$\begin{aligned} \lambda_{qs} &= -L_{ls} i_{qs} + M(i_{qs} - i'_{qr}) \\ \lambda_{ds} &= -L_{ls} i_{ds} + M(i_{ds} - i'_{dr}) \\ \lambda_{os} &= -L_{ls} i_{os} \\ \lambda'_{qr} &= L'_{lr} i'_{qr} + M(i_{qs} - i'_{qr}) \\ \lambda'_{dr} &= L'_{lr} i'_{dr} + M(i_{ds} - i'_{dr}) \\ \lambda'_{0r} &= L'_{lr} i_{0r} \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 L_{ls} 와 L'_{lr} 은 각각 고정자 권선과 고정자측으로 환산한 회전자 권선의 누설인덕턴스이고, M 은 고정자와 회전자 권선사이의 상호인덕턴스이다.

2. 정지좌표계에서의 등가회로와 토오크

전 절에서 얻은 임의속도 좌표계에서 유도발전기의 전압방정식과 자속쇄교수는 임의 좌표계 속도 ω 의 값에 따라 정지좌표계 ($\omega=0$), 회전자속도 좌표계 ($\omega=\omega_r$), 그리고 동기속도 좌표계 ($\omega=\omega_e$)에서의 관계식으로 쉽게 표현할 수 있다. 유도기의 해석에는 주로 정지좌표계나 동기속도 좌표계를 시스템의 구조나 사용의 편의성에 따라 적절하게 선택하여 사용하고 있다. 본 논문에서는 정지좌표계를 적용하여 해석한다.

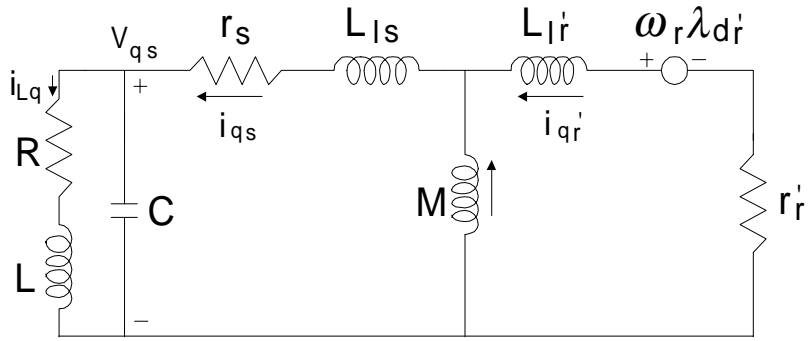
유도발전기의 중성점이 없을 때는 영상분은 고려할 필요가 없고 회전자 전압도 0이므로 이때의 전압방정식과 자속쇄교수는 각각 다음과 같이 된다 (Wang, 1999),(Krause, 1987).



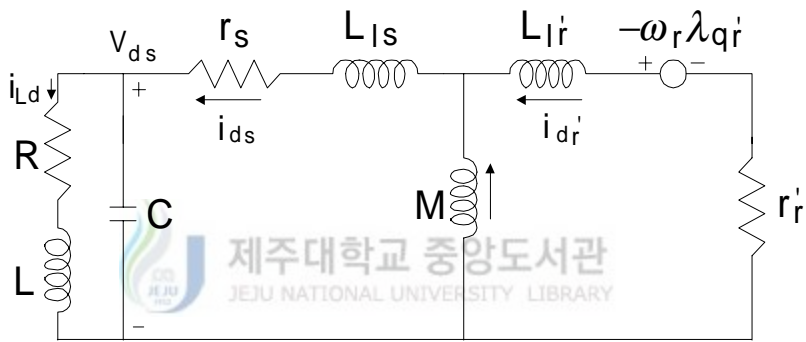
$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= -r_s i_{qs} + p\lambda_{qs} \\
 v_{ds} &= -r_s i_{ds} + p\lambda_{ds} \\
 0 &= r'_r i'_{qr} - \omega_r \lambda'_{dr} + p\lambda'_{qr} \\
 0 &= r'_r i'_{dr} + \omega_r \lambda'_{qr} + p\lambda'_{dr}
 \end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_{qs} &= -L_{ls} i_{qs} + M(i_{qs} - i'_{qr}) \\
 \lambda_{ds} &= -L_{ls} i_{ds} + M(i_{ds} - i'_{dr}) \\
 \lambda'_{qr} &= L'_{lr} i'_{qr} + M(i_{qs} - i'_{qr}) \\
 \lambda'_{dr} &= L'_{lr} i'_{dr} + M(i_{ds} - i'_{dr})
 \end{aligned} \tag{28}$$

이들 식과 자기여자 유도발전기의 단자 커패시터의 커패시턴스 C 와 부하저항 R 과 부하인덕턴스 L 이 직렬로 접속된 등가회로는 Fig. 2와 같이 된다.



a) Q axis equivalent circuit



b) D axis equivalent circuit

Fig. 2 D-q axis equivalent circuits with R-L load induction generator in the stationary reference frame

이 등가회로에서 상호인덕턴스 M 을 제외한 모든 정수들은 상수로 가정하고 M 은 자기포화의 영향을 고려하여 전류의 구간에 따라 다음과 같은 식으로 근사화한다(Wang, 1999) (Wang, 1997).

$$M = \frac{K_1}{K_2 + i_m} \quad , \quad i_{m1} < i_m < i_{m2} \quad (29)$$

여기서 i_m 은 다음 식으로 구한다(Bose, 1986).

$$i_m = [(i_{qs} - i'_{qr})^2 + (i_{ds} - i'_{dr})^2]^{1/2} \quad (30)$$

한편 유도발전기의 토오크식은

$$T_e = -2Hp \frac{\omega_r}{\omega_b} + T_I \quad (31)$$

으로 주어지고 우변의 첫째 항은 내부토오크를, 둘째항 T_I 는 입력토오크이고 $H[s]$ 는 관성정수, ω_b 는 기준각속도이다.

발전기 토오크 T_e 는



$$\begin{aligned} T_e &= -\frac{P}{2} [K_s^{-1} i_{qdos}]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{sr}] [K_r]^{-1} i'_{qdor} \\ &= -\left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) M(i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \end{aligned} \quad (32)$$

로 주어진다. 이식에서 P 는 극수이다.

(31)식과 (32)식에서 다음의 관계식을 얻을 수 있다(Krase, 1987).

$$2Hp \frac{\omega_r}{\omega_b} = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) M(i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) + T_I \quad (33)$$

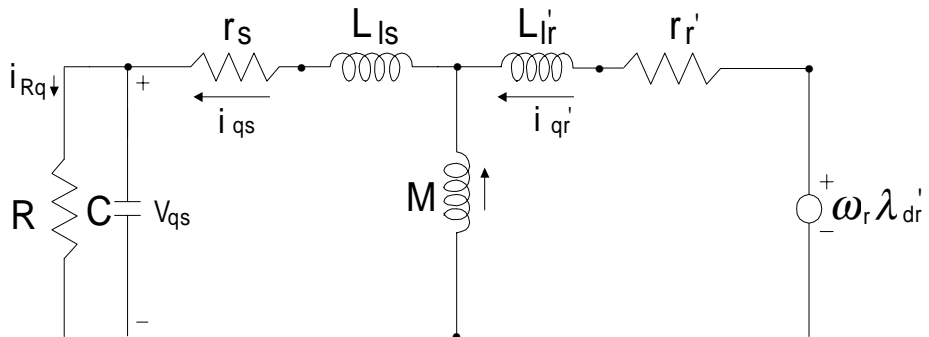
3. 상태변수해석

정지좌표계에서 얻은 $d-q$ 축 동기회로에서 동적전압 특성을 상태변수해석에 의하여 구한다. 보통 비감축회로(nondegenerate networks)에서는 인덕터의 전류와 커패시터의 전압을 상태변수로 택하지만 하나 이상의 커패시턴스와 전압원만으로도 된 루우프나 하나 이상의 인덕턴스와 전류원만으로도 된 컬세트를 포함하는 감축회로(degenerate networks)에서는 그렇지 않을 수도 있다 (Balabanian, 1986).

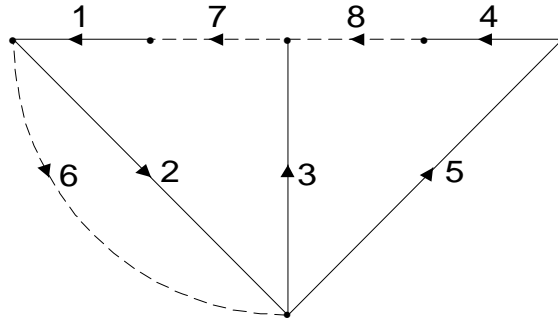
3. 1 무부하 및 저항부하시

무부하때는 Fig. 2의 회로에서 R 과 L 을 제거한 경우이고 저항부하때는 L 만 제거한 경우에 해당된다. 이 그림의 q 축과 d 축 동기회로에는 각각 하나씩의 인덕터만으로도 된 기본 컬세트를 포함한 감축회로이므로 각 회로에서 전체에너지 축척소자 수에서 하나를 뺀 수 만큼의 독립된 상태변수가 얻어진다.

저항부하인 경우 q 축 동기회로와 회로망 그래프는 Fig. 3과 같다.



a) Q axis equivalent circuit



b) Network graph for a)

Fig. 3 Q axis equivalent circuit and network graph with R load

이 그림에서 실선은 나무가지를, 파선은 보목가지를 표시하고 ㉠에서 ㉦까지는 마디번호를, 1에서 8까지는 가지번호를 나타낸다. 여기서 나무가지 전류를 보목가지 전류로, 보목가지 전압을 나무가지 전압으로 표시하면 다음과 같다.

$$i_1 = i_7 = i_{qs} \quad (34)$$

$$i_2 = -i_6 + i_7 \quad (35)$$

$$i_3 = i_7 - i_8 = i_{qs} - i'_{qr} \quad (36)$$

$$i_4 = i_8 = i'_{qr} \quad (37)$$

$$i_5 = i_8 = i'_{qr} \quad (38)$$

$$v_6 = v_2 = v_{qs} \quad (39)$$

$$v_7 = -v_1 - v_2 - v_3 \quad (40)$$

$$v_8 = v_3 - v_4 - v_5 \quad (41)$$

이 식들 가운데서 독립된 식은 (35), (40), (41)식이고 여기서 나무가지 전압과 전류사이의 관계를 이용하면

$$i_2 = C \frac{dv_{qs}}{dt} = -\frac{1}{R} v_{qs} + i_{qs} \quad (42)$$

$$v_7 = L_{ls} \frac{di_{qs}}{dt} = -r_s i_{qs} - v_{qs} - M \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di'_{qr}}{dt} \quad (43)$$

$$v_8 = L'_{lr} \frac{di'_{qr}}{dt} = M \frac{di_{qs}}{dt} - M \frac{di'_{qr}}{dt} - r'_r i'_{qr} - \omega_r \lambda'_{dr} \quad (44)$$

이 되고, 또한

$$\omega_r \lambda'_{dr} = \omega_r L'_{lr} i'_{dr} + \omega_r M (i_{ds} - i'_{dr}) \quad (45)$$

이므로 (45)식을 (44)식에 대입하여 정리할 수 있다.

(43)식과 (44)식은 각각

$$(L_{ls} + M) \frac{di_{qs}}{dt} - M \left(\frac{di'_{qr}}{dt} \right) = -v_{qs} - r_s i_{qs} \quad (46)$$

$$(L'_{lr} + M) \frac{di'_{qr}}{dt} - M \left(\frac{di_{qs}}{dt} \right) = -r'_r i'_{qr} - \omega_r (L'_{lr} - M) i'_{dr} - \omega_r M i_{ds} \quad (47)$$

이 된다.

d 축 등가회로에 대해서도 같은 방법으로

$$C \frac{dv_{ds}}{dt} = -\frac{1}{R} v_{ds} + i_{ds} \quad (48)$$

$$(L_{ls} + M) \frac{di_{ds}}{dt} - M \frac{di'_{dr}}{dt} = -v_{ds} - r_s i_{ds} \quad (49)$$

$$(L'_{lr} + M) \frac{di'_{dr}}{dt} - M \frac{di_{ds}}{dt} = -r'_r i'_{dr} + \omega_r (L'_{lr} - M) i'_{qr} + \omega_r M i_{qs} \quad (50)$$

의 관계식을 얻을 수 있다.

위의 (42), (46), (47), (48), (49), (50)식과 (33)식을 행렬로 표시하면

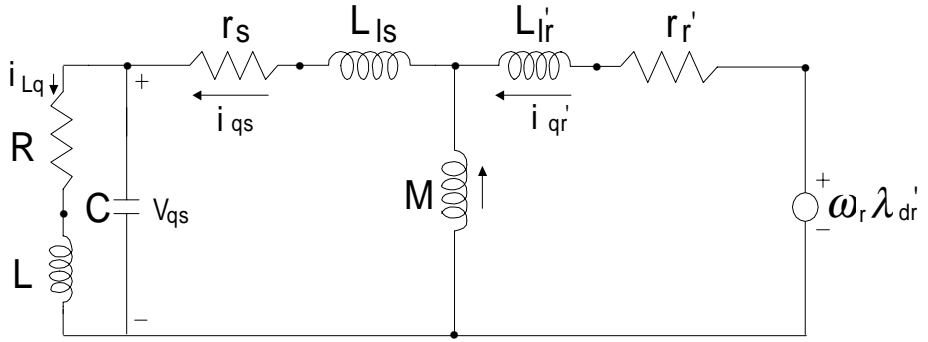
$$\begin{bmatrix} C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls}+M & -M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M & L'_{lr}+M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{ls}+M & -M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -M & L'_{lr}+M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2H/\omega_b \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ i_{qs} \\ i'_{qr} \\ v_{ds} \\ i_{ds} \\ i'_{dr} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/R & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r'_r & 0 & -\omega_r M & (L'_{lr}-M) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/R & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -r_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r M & \omega_r (L'_{lr}-M) & 0 & 0 & -r'_r & 0 \\ 0 & (3/2)(P/2) M i'_{dr} & 0 & 0 & 0 & -(3/2)(P/2) M i'_{qr} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ i_{qs} \\ i'_{qr} \\ v_{ds} \\ i_{ds} \\ i'_{dr} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_I \end{bmatrix} \quad (51)$$

이 된다.

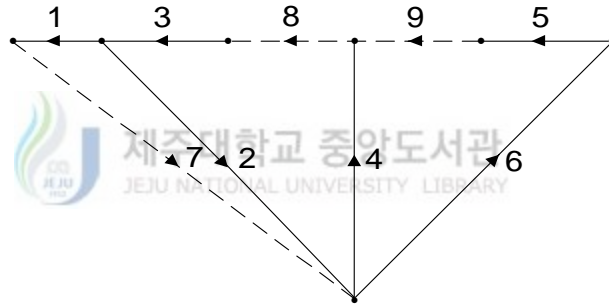
무부하인 경우는 (42)식과 (48)식에서 $-\frac{1}{R}$ 을 영으로 하여 계산한다.

3. 2 유도성 부하시

$R-L$ 부하에 대한 q 축 등가회로와 회로망 그래프는 Fig. 4와 같다.



a) Q axis equivalent circuit



b) Network graph for a)

Fig. 4 Q axis equivalent circuit and network graph with R-L load

이 경우에도 저항부하때와 같은 방법으로 나무가지 전류를 보목가지 전류로, 보목가지 전압을 나무가지 전압으로 표시하면 다음과 같다.

$$i_1 = i_7 = i_{Lq} \quad (52)$$

$$i_2 = -i_7 + i_8 \quad (53)$$

$$i_3 = i_8 = i_{qs} \quad (54)$$

$$i_4 = i_8 - i_9 \quad (55)$$

$$i_5 = i_9 = i'_{qr} \quad (56)$$

$$i_6 = i_9 \quad (57)$$

$$v_7 = -v_1 + v_2 \quad (58)$$

$$v_8 = -v_2 - v_3 - v_4 \quad (59)$$

$$v_9 = v_4 - v_5 - v_6 \quad (60)$$

독립된 식은 (53), (58), (59), (60)식을 나무가지 전압과 전류사이의 관계식을 이용하면

$$i_2 = C \frac{dv_{qs}}{dt} = -i_{Lq} + i_{qs} \quad (61)$$

$$v_7 = L \frac{di_{Lq}}{dt} = -R i_{Lq} + v_{qs} \quad (62)$$

$$v_8 = L_{ls} \frac{di_{qs}}{dt} = -v_{qs} - r_s i_{qs} - M \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di'_{qr}}{dt} \quad (63)$$

$$v_9 = L'_{lr} \frac{di'_{qr}}{dt} = M \frac{di_{qs}}{dt} - M \frac{di'_{qr}}{dt} - r'_r i'_{qr} - \omega_r \lambda'_{dr} \quad (64)$$

이 되고, 또한 $\omega_r \lambda'_{dr}$ 은 (45)식과 같으므로 이 식을 (64)에 대입하고 정리하면

$$(L'_{lr} + M) \frac{di'_{qr}}{dt} - M \frac{di_{qs}}{dt} = -r'_r i'_{qr} - \omega_r (L'_{lr} - M) i'_{dr} - \omega_r M i_{ds} \quad (65)$$

와 같이 된다.

따라서 (61), (62), (63), (65)식과 (33)식을 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls}+M & -M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M & L'_{lr}+M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{ls}+M & -M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -M & L'_{lr}+M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2H/\omega_b \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ i_{Lq} \\ i_{qs} \\ i'_{qr} \\ v_{ds} \\ i_{Ld} \\ i_{ds} \\ i'_{dr} \\ \omega_r \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r'_r & 0 & 0 & -\omega_r M & -\omega_r(L'_{lr}-M) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_r M & \omega_r(L'_{lr}-M) & 0 & 0 & 0 & -r'_r & 0 \\ 0 & \frac{(3/2)(P/2)M}{i'_{dr}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{(3/2)(P/2)M}{i'_{qr}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{Lq} \\ i_{qs} \\ i'_{qr} \\ v_{ds} \\ i_{Ld} \\ i_{ds} \\ i'_{dr} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_1 \end{bmatrix} \quad (66)$$

이상의 (51)식과 (66)식은

$$[G] \frac{d}{dt} [x] = [A][x] + [B]u \quad (67)$$

의 형으로 양변에 $[G]$ 의 역행렬을 취하면

$$\frac{d}{dt}[x] = [G]^{-1}[A][x] + [G]^{-1}[B]u = [AM][x] + [BM]u \quad (68)$$

과 같은 상태방정식이 된다.



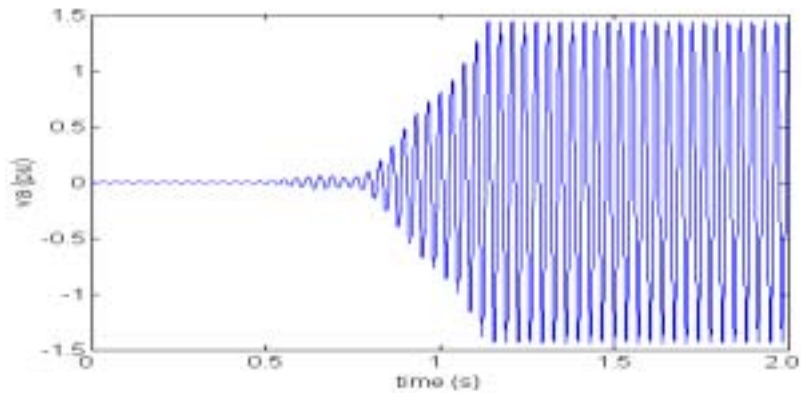
Ⅲ. 해석결과 및 검토

제안된 방법에 의하여 과도전압을 해석하기 위하여 사용한 기기는 Wang과 Su에 의하여 검증된 3상 권선형 유도기이다.

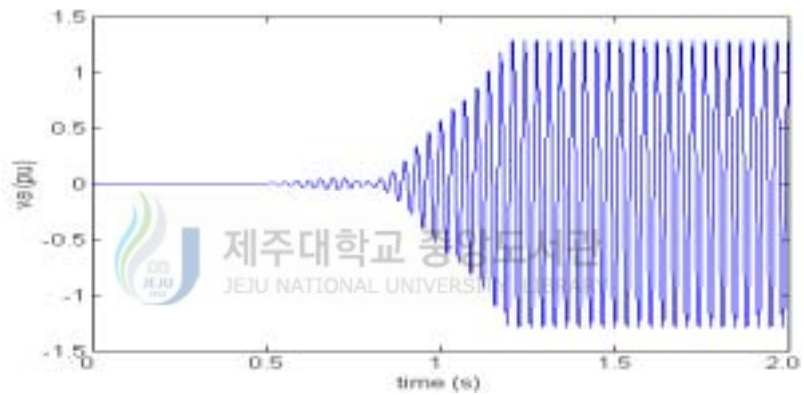
이 기기는 정격출력 1.1[KW], 정격전압 127/220[V], 정격전류 8.3/4.8[A], 정격주파수 60[HZ]의 2극기이다. 등가회로 정수는 $r_s=0.0779$ [pu], $r_r'=0.0781$ [pu], $L_{ls}=L_{lr}'=0.0895$ [pu]이고 M [pu]은 자화전류의 함수로 아래의 식(69)와 같다. 또한 발전기와 원동기의 합성관성정수 $H=0.055$ [s]이고 단자 커패시턴스의 리액턴스 $X_c=0.40306/3$ [pu]이다.

$$M = \begin{cases} 1.41566/(i_m + 0.1317), & 0.3578 < i_m \\ 1.59267/(i_m + 0.1929), & 0.3075 < i_m \leq 0.3578 \\ 1.79031/(i_m + 0.2550), & 0.2188 < i_m \leq 0.3075 \\ 2.67838/(i_m + 0.4900), & 0.1018 < i_m \leq 0.2188 \\ 3.997, & 0 < i_m \leq 0.1081 \end{cases} \quad (69)$$

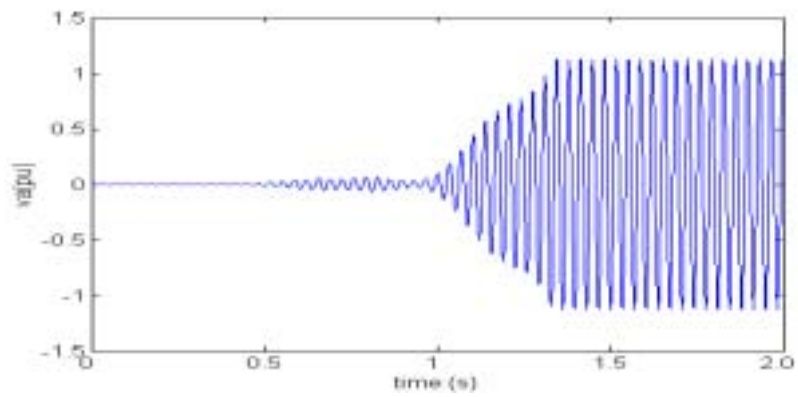
이 기기에 대하여 무부하, 저항부하, 유도성부하가 접속된 경우에 대하여 과도전압을 후퇴 오일러법으로 구하면 Fig. 5와 같다. 해석을 위하여 커패시터의 초기전압과 발전기의 입력토크만 고려하였다.



a) at no load



b) at resistance load



c) at inductive load

Fig. 5 Analyzed transient voltage characteristics

모든 경우에 대하여 커패시터의 초기전압은 $v_{qs} = v_{ds} = 5 \times 10^{-3}[\text{pu}]$, 상호 인덕턴스의 초기값은 $M = 3.997[\text{pu}]$ 로 하고 회전각속도 ω_r 은 기동시 0[rad/s]에서부터 정상운전시의 182[rad/s]로 하여 계산하였다.

Fig. 3 a)는 무부하의 경우로 입력토크 T_I 는 0.8[pu]일 때의 a상의 전압 확립과정으로 기동에서 정상상태까지의 시간은 1.139[s] 소요되고 정상상태의 상전압의 최대값은 1.438[pu]이다.

Fig. 3 b), c)는 각각 저항부하와 유도성부하인 경우로 T_I 는 0.8[pu]로 주고 저항부하의 저항은 3.023[pu], 유도성부하의 저항은 2.719[pu]이고 인덕턴스는 4.969[pu]로 주었을 때의 a상의 과도전압이다. 그림에서 보는 바와 같이 저항부하와 유도성부하에서 정상상태에 도달하는 시간은 각각 1.208[s], 1.346[s]가 소요되고 정상상태의 최대값은 각각 1.288[pu], 1.124[pu]가 됨을 알 수 있다.

이상의 결과에서 보듯이 커패시터의 초기전압과 정상상태의 회전각속도를 일정하게 유지 할 때 부하의 종류와 크기, 그리고 입력토크의 크기에 따라 정상상태 도달시간과 전압의 최대값이 달라질 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

커패시터 자기여자 유도발전기의 과도전압특성을 정지좌표계의 d-q축 등가 회로로부터 구한 상태방정식과 토오크 평형식으로 구성된 상태방정식에 의하여 해석하였다. 정지좌표계의 등가회로는 임의속도 좌표계의 전압방정식으로부터 정지좌표계의 조건을 이용하여 구성하였다. 등가회로에서는 고정자와 회전자의 상호인덕턴스만 자기포화를 고려하여 자화전류의 함수로 하였고 나머지 정수들은 상수로 가정하였다.

해석은 커패시터의 초기전압, 발전기의 입력토오크, 그리고 회전수를 가정하여 무부하, 저항부하 그리고 유도성부하에 대하여 과도전압특성을 후퇴 오일러법으로 해석하여 검토하였다.



참 고 문 헌

- B. K. Bose, "Power electronics and ac drive", Prentice Hill, 1986.
- C. Grantham, D. Sutanto, and B. Mismail, "Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators", Proc. IEE, vol.136, pt.B, No.2, 1989, pp.61-68.
- E. D. Basset and F. M. Potter, "Capacitive excitation of induction generators", AIEE Trans, vol.54, 1935, pp.540-545.
- L. Quazene and G. Mcpherson, Jr., "Analysis of the isolated induction generator", IEEE Trans. PAS, vol.102, No.8, 1983, pp.2793-2798.
- L. Wang and J. Y. Su. "Dynamic performances of an isolated self-excited induction generator under various loading conditions", IEEE Tans. EC, vol.14, No.1, 1999, pp.93-100.
- L. Wang and C. H. Lee, "A novel analysis on the performances of an isolated self-excited induction generator", IEEE Trans. EC, vol.12, No.2, 1997, pp.109-117.
- N. Balabanian, T. Bickert, and S. Seshu, "Electrical network theory", Wiley, 1967.

P. C. Krause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill Book Company, 1987.

S. S Murthy, O. P. Malik, and A. K. Tandon, "Analysis of self excited induction generators", Proc. IEE, vol.129, No.6, 1982, pp.260-265.



감사의 글

希望과 期待를 안고 大學院 門을 들어선 지가 어느덧 두 해, 길다면 길고 짧다면 짧았던 時間을 앞만 보며 달려왔던 것 같습니다. 지난 두 해 동안 힘들었던 일, 재미있었던 일, 아쉬웠던 일, 기뻐던 일들이 이제 와서 돌이켜보니 走馬燈처럼 腦裡를 스쳐가지만 그래도 주위의 激勵과 사랑으로 참 幸福한 시간들이었고 진한 추억으로 되새겨집니다.

이 論文이 완성되기까지 부족한 저를 친부모님 이상의 자상하신 모습으로 부단한 助言과 激勵 그리고 豊富한 知識을 베풀어주신 좌종근 지도 교수님께 眞心으로 머리 숙여 감사드리오며, 그 외 많은 가르침을 주셨던 분들- 無言의 關心으로 멀리서 지켜봐 주신 오성보 교수님, 어떤 話題든 관계없이 편하게 이야기할 수 있었던 이개명 교수님, 같은 研究室 大學院生은 아니면서도 늘 지도교수님처럼 정성어린 關心과 폭넓은 見聞을 하도록 해주신 김일환 교수님, 언제나 근엄한 큰형 같으신 김세호 교수님, 부드러우면서도 절친한 형 같으신 김호찬 교수님-께도 아울러 感謝의 뜻을 전합니다. 또한 자주 찾아 뵙지는 못했지만 언제나 마음속에 잊혀지지 않는 제주산업정보대학에 계신 강경보 교수님, 김태균 교수님, 좌종철 교수님께도 늦게나마 感謝드리며 電氣工夫 첫 入門할 때 가르침을 주셨던 高等學校 電氣科 恩師님께도 더불어 感謝드립니다.

大學院 2년 동안 서로에게 버팀목이 되어온 부창진, 전영진, 김정웅 同期院生과 研究課程에 많은 도움을 준 電氣器機 研究室 家族, 바쁜 가운데에서도 도움을 준 문동춘, 현덕수, 김재홍 先輩院生과 박성기, 김태한, 강찬호 後輩院生 그리고 産業大學院 同期 兄님들이신 양완국, 고승우, 양문길, 강택근 院生, 物心兩面 行政的인 지원을 아끼지 않고 자기 일처럼 도와준 科 事務室 강 조교선생님과 현 조교선생님을 비롯하여 보이지 않는 곳에서 여러모로 지지가 되어 주신 저를 아는 모든 분들에게도 고마움을 表합니다.

끝으로 오늘 제가 있기까지 사랑과 犧牲으로 不肖한 막내아들 뒷바라지하시느라 오늘도 구슬땀을 흘리고 계시는 사랑하는 어머님, 그리고 어려울 때마다 굳건한 勇氣와 따뜻한 激勵을 아끼지 않으셨던 큰형, 누나, 그리고 작은형들과 이 기쁨을 함께 하고자 합니다.

2002年 12月

김도진 올림