

상태방정식에 의한 자기여자 유도발전기의 과도전압특성

김도진*, 좌종근**

*제주대학교 대학원, **제주대학교 전기전자공학부

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

Do-Jin Kim*, Chong-Keun Jwa**

*Graduate school, Cheju Natl Univ, **Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Cheju Natl Univ.

ABSTRACT - 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.

1. 서 론

1935년^[1] 이래 커패시터 자기여자 유도발전기에 대한 많은 연구가 되어오고 있다. 또한 근래에 대두되고 있는 에너지 자원고갈에 대비하여 대체에너지원으로서 풍력이나 소수력발전기로서 유도발전기가 널리 사용되고 있다. 유도발전기는 유지비의 저렴, 과도특성의 향상, 직류여자전원의 불필요, 그리고 농형에서는 브러시가 없는 구조 등 동기발전기에 비교하여 많은 장점들을 가지고 있다.

이에 따라 자기여자 유도발전기에 대한 정상상태의 대표적인 해석으로는 Murthy et al^[2]에 의한 루우프 임피던스법과 Quazen과 Mcpherson^[3]에 의한 절점 어드미턴스법이 있으나 이들은 모두 IEEE 권장 T형 등가회로를 사용하고 있다. Grantham et al^[4]은 정상상태 해석에 T형 등가회로를 사용해서 여자회로의 포화 와 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^[5]는 임의 기준틀에서의 d-q축 모델을 사용하여 무부하, 저항부하, 유도성부하, 그리고 용량성 부하에 대하여 이들이 발전기에 순시접속시와 차단시의 단자전압과 자화리액턴스의 변화를 분석하였다. Wang과 Lee^[6]는 정지기준틀에서의 d-q축 모델을 사용하여 고유치와 고유치 감도해석에 기초한 자기유도발전기의 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 고려하여 해석하기 위하여 정지기준틀에서의 d-q축 등가회로를 사용하고 이 등가회로부터 상태방정식을 구성하여 토오크식과 결합해서 부하종류에 따른 과도전압특성을 해석하였다.

2. 유도 발전기 모델

1) 등가회로와 토오크

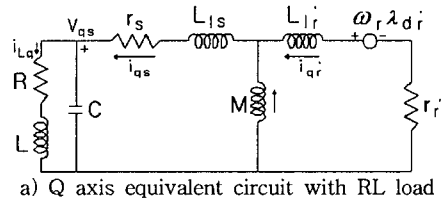
유도발전기의 중성점이 없을 때는 영상분을 고려할 필요가 없고 회전자 단자전압도 0이므로 정지 기준틀 전압방정식과 자속쇄교수는 임의기준틀식에서 정지기준틀의 조건을 이용하면 다음과 같이 된다.^{[5],[7]}

$$\left. \begin{aligned} v_{qs} &= -r_s i_{qs} + p \lambda_{qs} \\ v_{ds} &= -r_s i_{ds} + p \lambda_{ds} \\ 0 &= r_r' i_{qr}' - \omega_r \lambda_{dr}' + p \lambda_{qr}' \\ 0 &= r_r' i_{dr}' + \omega_r \lambda_{qr}' + p \lambda_{dr}' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

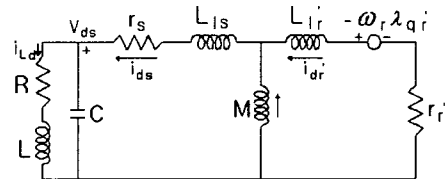
$$\left. \begin{aligned} \lambda_{qs} &= -L_{ls} i_{qs} + M (i_{qs} - i_{qr}') \\ \lambda_{ds} &= -L_{ls} i_{ds} + M (i_{ds} - i_{dr}') \\ \lambda_{qr}' &= -L_{lr}' i_{qr}' + M (i_{qs} - i_{qr}') \\ \lambda_{dr}' &= -L_{lr}' i_{dr}' + M (i_{ds} - i_{dr}') \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

이 식에서 v, i 그리고 λ 는 각각 전압, 전류 그리고 자속쇄교수를, 하첨자 q와 d는 각각 q축과 d축 성분을, 하첨자 s와 r은 각각 고정자와 회전자 값을, 하첨자 l은 누설 성분을, r, L 그리고 M 은 각각 저항, 인덕턴스 그리고 상호인덕턴스, '(prime)은 회전자측을 고정자측으로 환산한 값을, 그리고 p 는 d/dt 를 나타낸다.

이식들과 자기여자 유도발전기의 단자커패시터의 커패시턴스 C 와 부하저항 R 과 부하인덕턴스 L 이 직렬로 접속된 등가회로는 Fig.1과 같이 된다.



a) Q axis equivalent circuit with RL load



b) D axis equivalent circuit with RL load

Fig.1 D-Q axis equivalent circuit of an induction generator in the stationary reference frame

이 등가회로에서 상호인덕턴스 M 을 제외한 모든정수들은 상수로 가정하고 M 은 자기포화의 영향을 고려하여 자화전류의 구간에 따라 다음과 같은 식으로 구간 근사화한다.^{[5],[6]}

$$M = \frac{K_1}{K_1 + i_m}, \quad i_{m1} < i_m \leq i_{m2} \quad (3)$$

여기서 i_m 은 다음식으로 구한다.^[8]

$$i_m = [(i_{qs} - i_{qr}')^2 + (i_{ds} - i_{dr}')^2]^{1/2} \quad (4)$$

한편 유도발전기의 토오크식은 다음과 같다.^[7]

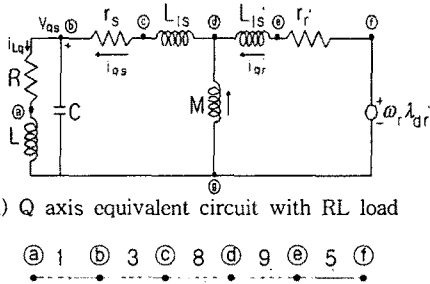
$$2Hp \frac{\omega_r}{\omega_b} = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) M (i_{qs} i_{qr}' - i_{ds} i_{dr}') + T_1 \quad (5)$$

이 식에서 H 는 관성정수를, P 는 극수, T_1 는 입력토크오크이며, ω_r 과 ω_b 는 각각 회전자 각속도와 기준 각속도를 나타낸다.

2) 상태변수해석

Fig. 1의 등가회로에서 과도전압특성을 상대변수해석에 의하여 구한다. 보통 비감속회로에서는 인덕터의 전류와 커패시터의 전압을 상태변수로 택하지만 감속회로에서는 그렇지 않을 수도 있다.^[9]

유도성부하에 대한 q 축 등가회로와 회로망 그래프는 Fig. 2와 같다.



1 2 3 4 5 6

b) Network graph for a)

Fig.2 Q axis equivalent circuit and network graph with RL load

이 그림에서 실선은 나무가지들, 파선은 보목가지들 표시하고 ①에서 ⑥까지는 절점 번호를, 1에서 9까지는 가지번호를 나타낸다. 여기서 나무가지전류를 보목가지전류로, 보목가지전압을 나무가지전압으로 표시하면 다음과 같다.

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_r' & 0 & 0 & \omega_r M & (L_{ls}' - M) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_r & 0 & 0 & 0 & r_r' & 0 \\ & & & (L_{ls}' - M) & & & & & \\ 0 & (3/2)(P/2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (3/2)(P/2) & 0 \\ & M i_{dr}' & & & & & & M i_{qr}' & \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[B] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ T_1]^T \quad (20)$$

$$u = 1 \quad (21)$$

이고,

$$i_1 = i_7 = i_{Lq} \quad (6)$$

$$i_2 = -i_7 + i_8 \quad (7)$$

$$i_3 = i_8 = i_{qs} \quad (8)$$

$$i_4 = i_8 - i_9 \quad (9)$$

$$i_5 = i_9 = i_{qr}' \quad (10)$$

$$i_6 = i_9 \quad (11)$$

$$v_7 = -v_1 + v_2 \quad (12)$$

$$v_8 = -v_2 - v_3 - v_4 \quad (13)$$

$$v_9 = v_4 - v_5 - v_6 \quad (14)$$

독립된 식인 (7), (12), (13) 그리고 (14)식을 나무가지전압과 전류사이의 관계식을 이용하고, $\omega_r \lambda_{dr}'$ 의 λ_{dr}' 을 (2)식의 결과를 대입하여 토오르크식인 (5)식과 같이 정리하면

$$[G] \frac{d}{dt} [x] = [A][x] + [B]u \quad (15)$$

로 주어지므로, 양변에 $[G]$ 의 역행렬을 취하면

$$\frac{d}{dt} [x] = [AM][x] + [BM]u \quad (16)$$

과 같은 방정식이 된다.

이 식에서

$$[G] = \begin{bmatrix} 0 & L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_s + M & -M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M & L_{ls}' + M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{ls} + M & -M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -M & L_{ls}' + M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2H/\omega_b \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[x] = [v_{qs} \ i_{Lq} \ i_{qs} \ i_{qr}' \ v_{ds} \ i_{Ld} \ i_{ds} \ i_{dr}' \ \omega_r] \quad (18)$$

3) 해석결과 및 검토

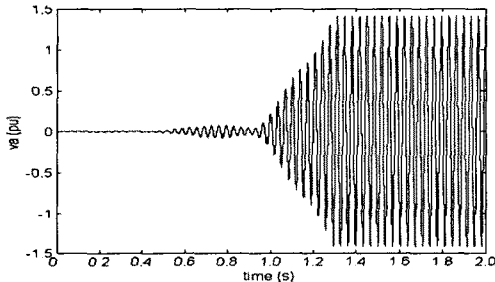
제안된 방법에 의하여 과도전압을 해석하기 위하여 사용한 기기는 Wang과 Su^[5]에 의하여 검증된 3상 권선형 유도기이다.

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(24)와 같다.

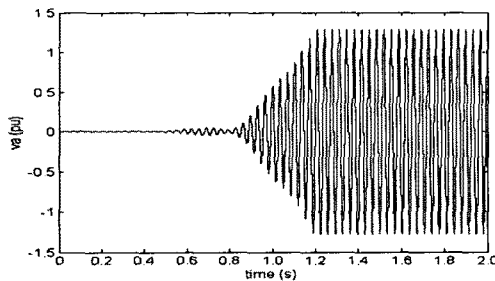
또한 발전기와 원동기의 합성관성정수 $M=0.055$ [s]이고 단자 커패시턴스의 리액턴스 $X_c=0.40306/3$ [pu]이다.

$$M = \begin{cases} 1.41566/(i_m + 0.1317), & 0.3578 < i_m \\ 1.59267/(i_m + 0.1929), & 0.3075 < i_m \leq 0.3578 \\ 1.79031/(i_m + 0.2550), & 0.2188 < i_m \leq 0.3075 \\ 2.67838/(i_m + 0.4900), & 0.1018 < i_m \leq 0.2188 \\ 3.997, & 0 < i_m \leq 0.1081 \end{cases} \quad (24)$$

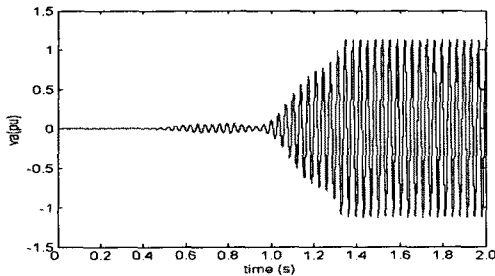
이 기기에 대하여 무부하, 저항부하, 유도성부하가 접속된 경우에 대하여 과도전압을 후퇴 오일러법으로 구하면 Fig. 3과 같다. 해석을 위하여 커패시터의 초기전압과 발전기의 입력토크만 고려하였다.



a) at no load



b) at resistance load



c) at inductive load

Fig. 3 Transient voltage responses of the studied induction generator

모든 경우에 대하여 커패시터의 초기전압은 $v_{cs} = v_{ds} = 5 \times 10^{-3}$ [pu], 상호인덕턴스의 초기값은 $M=3.997$ [pu]라고 하고 회전각속도 ω_r 은 기동시 0[pu]에서부터 정상운전시의 182[pu]로 하여 계산하였다.

Fig. 3 a)는 무부하의 경우로 입력토크 T_1 는 0.5[pu]일 때의 a상의 전압확립과정으로 기동에서 정상상태까지의 시간은 1.294[s] 소요되고 정상상태의 상전압의 최대값은 1.410[pu]이다.

Fig. 3 b), c)는 각각 저항부하와 유도성부하인 경우로 T_1 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 유지할 때 부하의 종류와 크기, 그리고 입력토크의 크기에 따라 정상상태 도달시간과 전압의 최대값이 달라질 수 있음을 알 수 있다

3. 결 론

커패시터 자기여자 유도발전기의 과도전압특성을 정지기준틀의 d-q축 등가회로부터 구한 상태방정식과 토크 평형식으로 구성된 상태방정식에 의하여 해석하였다. 정지기준틀의 등가회로는 임의기준틀의 전압방정식으로부터 정지기준틀의 조건을 이용하여 구성하였다. 등가회로에서는 고정자와 회전자의 상호인덕턴스만 자기포화를 고려하여 자화전류의 함수로 하였고 나머지 정수들은 상수로 가정하였다.

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

[참고문헌]

- [1] E. D. Basset and F. M. Potter, "Capacitive excitation of induction generators", AIEE Trans, vol.54, 1935, pp.540-545.
- [2] 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.
- [3] L. Quazene and G. Mcpherson, Jr., Analysis of the isolated induction generator", IEEE Trans. PAS, vol.102, No.8, 1983, PP.2793-2798.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] P. C. Krause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [8] B. K. Bose, "Power electronics and ac drive", Prentice Hill, 1986.
- [9] N. Balabanian, T. Bickert, and S. Seshu, "Electrical Network theory", Wiley, 1967.