濟州大學校 産業技術硏究所 論文集, 第6卷, pp.119~124, 1995
Cheju National Univ. R.I.I.T. Jour., Vol.6, pp.119~124, 1995

風力 驅動 自己勵磁 誘導發電機의 解析

- 節点法과 루우프法의 比較 -

左 宗 根*

Analysis of Wind Driven Self-excited Induction Generators.

- Comparison of Nodal and Loop Method -

Chong-Keun Jwa*

ABSTRACT

Two methods for the steady state analysis of wind driven self-excited induction generators are investigated in this paper. In this analysis, the T-type equivalent circuit neglected the core loss is used to predict the steady state performance under the resistance load. Computed results for the loop impedance and the nodal admittance method show very good agreement between the two. To maintain a constant terminal voltage and frequency, a simple method for determining the parameters speed, terminal capacitance, and exciting reactance is also introduced.

Key words : Induction generator, Self-excitation, Loop impedance, Nodal admittance

Ⅰ. 序 論

자기여자에 의한 직류 분권 발전기의 전압확립과정과 유사하게 유도발전기도 단자에 적당한 커패시터가 접속되어 있을 때 전압이 유도된다. 잔류자기에 의하여 고정자 권선에 유기된 낮은 교류전압 즉, 커패시터에 인가된 전압은 고정자 권선에 흐르는 여자전류의 원인이 된다. 커패시터의 커패시턴스가 적당한 값이면 공극의 자속을 증가시킬 수 있게 충분한 전류가 흐르게 된다. 공극자속의 증가는 결과적으로 높은 전압을 유도하고 커패시턴스에 의해서 큰 여자전류가 흘러 최종전압까지 이 과정을 반복하게 된다. 이 최종전압은 기기의 포화곡선과 커패시터의 용량성리액턴스에 의해 결정된다. 이 과정을 유도발전기의 자기여자에 의한 전압확립과정이라 한다.

이 현상에 대한 초기의 문헌에서 Bassett and Potter[1]는 저항부하에서 발전기동작의 시험결과를 발표하였고, Wagner[2]는 무부하와 부하시에 몇개의 조건에 대한 계산을 하고 시험결과와 비

* 제주대학교 전기공학과
Dept. of Electrical Eng., Cheju Nat'l Univ.

교하였다.

자기여자 발전기의 주파수와 여자리액턴스는 회전속도가 일정하게 유지될 때에도 부하조건에 따라 변화한다. 일반적으로 이 발전기의 정상상태해석의 기본적인 문제는 기기정수,속도,단자커패시턴스와 부하임피던스가 주어질 때 주파수와 여자리액턴스를 결정하여 단자전압을 구하는 것이다.

지금까지 많은 연구자들은 등가회로를 사용하여 이 문제의 해를 구하는 두가지의 다른 방법을 사용해 왔다. Murthy et al[3], Raina and Malik[4], Tandon et al[5], 그리고 Malik and Haque[6]이 사용한 루우프 임피던스법과 Quazen and Mcpherson[7]에 의한 절점 어드미턴스법이 있고 Chan[8]은 두방법을 경우에 따라 모두 사용하였다.

Murthy et al[3]에 의한 루우프 임피던스법에서는 주어진 부하와 속도에 대하여 주파수와 여자리액턴스를 미지수로하는 두개의 비선형 연립방정식을 루우프 임피던스의 실수부와 허수부를 각각 영으로 계산하여 얻었다. Quazen and Mcpherson[7]에 의한 절점어드미턴스법에서는 유효전력평형만을 고려하여 주파수를 결정할 수 있는 잇점이 있고 부하,용량성리액턴스,그리고 계산될 고정자리액턴스와 결합된 어드미턴스가 필요하고 많은 대수계산을 해야한다.

본 연구에서는 독립전원용 풍력구동 발전기로 자기여자 유도발전기가 사용되고 이들 두방법에 대한 해석결과의 비교에 대한 보고가 되어 있지 않고 있으므로 저항부하인 경우에 대하여 계산치와 실험치가 비교되어 검증된 기기정수들을 사용하여 두방법을 비교 검토하였다.

또한 저항부하에서 정전압과 정주파수를 유지하기위한 회전속도,단자커패시턴스 및 여자리액턴스의 값을 구하는 간명한 방법도 제시하였다.

II. 解析理論

2.1 등가회로

정상상태에서 해석을 위한 저항부하의 고정자측으로 환산한 1상당의 등가회로는 Fig.1 과 같고, 다음과 같은 가정을 둔다.

i)포화의 영향을 받는 여자리액턴스를 제외한 모든 등가회로 정수는 상수이다.

ii)철손은 무시한다.

iii)유도전압,전류에서 기자력의 공간고조파와 시간고조파는 무시한다.

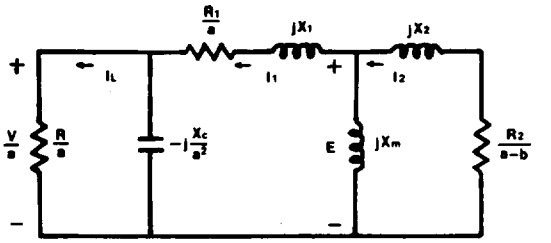

Fig. 1 Equivalent circuit of the induction generator with resistance load

이 회로의 회로정수중 R, X는 각각 저항과 리액턴스이고 V, E는 단자전압과 공극전압이며, I는 전류이다. X_m, X_c는 자화리액턴스 및 단자커패시터의 용량성리액턴스이고 a, b는 각각 단위법 주파수및 속도이다. 첨자 1,2,L 은 각각 고정자,고정자측으로 환산한 회전자, 그리고 부하의 값을 의미한다.

다음은 자기여자 발전기의 정상상태 해석을 위한 Murthy et al[3] 의 루우프 임피던스법과 Quazen and McPherson[7]의 절점어드미턴스법에 의한 해석과정이다.

2.2 루우프 임피던스법

Fig. 1에서 전류 I_1 에 대한 루우프 방정식은 다음과 같다.

$$Z I_1 = 0 \tag{1}$$

여기서, Z 는 전루우프 임피던스로

$$Z = \left(\frac{R}{a}\right)//\left(-j\frac{X_c}{a^2}\right) + \left(\frac{R_1}{a} + jX_1\right) + (jX_m)//\left(\frac{R_2}{a-b} + jX_2\right) \tag{2}$$

이다.

자기여자 조건하에서는 $I_1 \neq 0$이므로 (1)식에서 $Z=0$, 즉 Z의 실수부와 허수부가 각각 0이 되어야 함을 의미한다.

실수부는

$$(p_1+p_2X_m)a^3+(p_3+p_4X_m)ba^2 + (p_5+p_6X_c+p_7X_cX_m)a + (p_8X_c+p_9X_cX_m)b = 0 \quad (3)$$

이고, 허수부는

$$(q_1+q_2X_c+q_3X_cX_m+q_4X_m)a^2 + (q_5+q_6X_c+q_7X_cX_m+q_8X_m)ba+q_9X_c = 0 \quad (4)$$

이다.

(3), (4)식의 계수 $p_i(i=1,2,\ldots,9)$, $q_i(i=1,2,\ldots,9)$는 부록에 보인다.

(3)식과 (4)식에서 X_m과 a를 수치해석 방법으로 풀기 위하여 다음과 같은 초기 추측값으로

$$X_{m0} = X_m \text{ (미포화치)}, \quad a = b \quad (5)$$

반복하여 요구되는 정확도 까지 계산한다. 여기서 a와 X_m의 값은 정의 실근만이 물리적으로 의미가 있다.

2.3 절점어드미턴스법

유효,무효전력 보존의 회로양으로 표현은 Fig.1에서 세가지의 어드미턴스합이 영이 되어야 한다는 것이다.

$$Y_1 + Y_m + Y_2 = 0 \quad (6)$$

여기서 Y_1은 단자커패시턴스와 병렬인 부하저항과 고정자가지, Y_m은 여자리액턴스가지, 그리고 Y_2는 회전자가지의 어드미턴스이다.

단자커패시턴스와 병렬저항부하의 임피던스를 $Z_L = R_L - jX_L$라 하면 R_L과 X_L은 다음과 같다.

$$R_L = \frac{R X_c^2}{a\,[(aR)^2+X_c^2]} \quad (7)$$

$$X_L = \frac{R^2 X_c^2}{(aR)^2+X_c^2} \quad (8)$$

(6)식이 영이라는 것은 실수부와 허수부가 각각 영임을 의미하므로 실수부는

$$\frac{\frac{R_1}{a}+R_L}{\left(\frac{R_1}{a}+R_L\right)^2+(X_1-X_L)^2} + \frac{\frac{R_2}{(a-b)}}{\left(\frac{R_2}{a-b}\right)^2+X_2^2} = 0 \quad (9)$$

이고, 허수부는

$$-\frac{1}{X_m} - \frac{X_1-X_L}{\left(\frac{R_1}{a}+R_L\right)^2+(X_1-X_L)^2} - \frac{X_2}{\left(\frac{R_2}{a-b}\right)^2+X_2^2} = 0 \quad (10)$$

이다.

(9)식을 다시쓰면

$$Q_1a^5+Q_2a^4+Q_3a^3+Q_4a^2+Q_5a+Q_6 = 0 \quad (11)$$

이 되고, 여기서 계수 $Q_i(i=1,2,\ldots,6)$는 부록에 보인다.

(11)식에서 정의실근인 a를 구하여 (10)식에 대입하고 X_m을 구하면

$$X_m = \frac{\left(\frac{R_1}{a}+R_L\right)\left[\left(\frac{R_2}{a-b}\right)^2+X_2^2\right]}{\left(\frac{R_2}{a-b}\right)(X_1-X_L)-X_2\left(\frac{R_1}{a}+R_L\right)} \quad (12)$$

이 된다.

2.4 해석

각 방법에 의해 구한 X_m과 a를 사용하여 공극전압을 무부하 동기속도시험에서 얻은 다음과 같은 구간 선형화식에서 구한다.

$$\frac{E}{a} = K_1 - K_2 X_m \tag{13}$$

이 공극전압으로 다음식에 의하여 단자전압이 구해지고 전류및 전력도 단계적으로 구할 수 있다.

$$V = \left| \frac{{R_L}^2 + {X_L}^2}{\left(\frac{R_1}{a} + R_L\right)^2 + (X_1 - X_L)^2} \right|^{\frac{1}{2}} aE \tag{14}$$

정격전압,정격주파수로 운전하기 위해 필요한 회전수,단자커패시턴스, 그리고 여자리액턴스는 다음과 같이하여 결정된다.

(11)식, (12)식, 그리고 (14)식을 연립하여 풀 수 있도록 (14)식에 포함된 공극전압 E를 X_m의 식으로 대치한다. (13)식도 사용할 수 있지만 구간선형화 되어 있어서 구간 마디의 계수 K_1과 K_2의 값이 달라 조건식을 사용하여 풀어야 하는 번거로움이 있으므로 다항식 curve fitting으로

$$E = E_0 + E_1 X_m + E_2 {X_m}^2 + E_3 {X_m}^3 + E_4 {X_m}^4 \tag{15}$$

와 같이 하나의 식으로 표현하여 이식을 (14)식에 대입하여 해를 구한다.

III. 事例研究및 比較

루우프법과 절점법의 해석결과를 비교하기 위하여 Quazen and Mcpherson[7]이 사용한 정수와 Chan[8]의 정수를 사용하였고 이것들을 각각 Table 1과 Table 2에 보였다.

Table 1에 표시된 정수의 유도발전기가 단자에 $C = 239$ [μF] 의 커패시터가 접속되고 $R = 75$ [Ω] 의 저항부하로 운전될때 회전수를 2500 [*RPM*] 에서 3400 [*RPM*] 까지 100 [*RPM*] 간격으로 변화시킬때 두해석법에 의한 결과를 Table 3에 보였다.

Table 2의 유도발전기가 $X_c = 1$ [*pu*] 의 커패시터가 단자에 연결되고 $b = 1$ [*pu*] 의 속도로 운전될때 저항부하를 0.8 [*pu*] 에서 2.6 [*pu*] 까지 0.2 [*pu*] 간격으로 변화시킬때의 결과를 *Table* 4.에 보였다.

이들 결과에서 보는 바와 같이 두해석방법에는 표현상의 차이는 있지만 해석결과는 오차가

Table 1 Quazen and Mcpherson's circuit parameters of induction generator

Specifications	Circuit parameters
3ϕ, 2*pole* *frequency* 60 [*Hz*] *voltage* 208 [*V*] *output* 10 [*HP*] *star connected* *squirrel cage*	$R_1 = 0.148$ [Ω] $R_2 = 0.144$ [Ω] $X_1 = 0.423$ [Ω] $X_2 = 0.252$ [Ω] $E_1 = \begin{cases} 0 & , 23.540 < X_m \\ -11.564 X_m + 392.553 & , 21.179 < X_m \leq 23.540 \\ -6.404 X_m + 283.270 & , 19.442 < X_m \leq 21.179 \\ -3.861 X_m + 233.829 & , 17.085 < X_m \leq 19.442 \\ -2.563 X_m + 211.653 & , 14.718 < X_m \leq 17.085 \\ -1.648 X_m + 198.187 & , 12.877 < X_m \leq 14.718 \\ -1.181 X_m + 192.173 & , 12.021 < X_m \leq 12.877 \end{cases}$ [*V*]

Table 2 Chan's circuit parameters of induction generator

Specifications	Circuit parameters [pu]
3ψ, 4*pole* *frequency* 50 [*Hz*] *voltage* 380 [*V*] *output* 2 [*KW*] *star connected* *squirrel cage*	$R_1=0.0982 \quad R_2=0.0621$ $X_1=0.1120 \quad X_2=0.0952$ $E_1=\begin{cases} -0.1649X_m+1.2054, & X_m<1.400 \\ -0.2830X_m+1.3710, & 1.400\leq X_m<1.861 \\ -0.6087X_m+1.9773, & 1.861\leq X_m<2.193 \\ -0.8086X_m+2.4155, & 2.193\leq X_m<2.987 \\ 0, & 2.987\leq X_m \end{cases}$

Table 3 Comparison of the loop method and the nodal method using Quazen and Mcphersob's data

Speed [RPM]	Loop method		Nodal method	
	Phase voltage [V]	Frequency [Hz]	Phase voltage [V]	Frequency [Hz]
2500	90.68038	41.58044	90.68039	41.58044
2600	108.87468	43.24308	108.87468	43.24308
2700	120.86773	44.90566	120.86773	44.90556
2800	129.94231	46.56816	129.94231	46.56816
2900	138.54310	48.23058	138.54310	48.23058
3000	146.04189	49.89292	146.04189	49.89292
3100	153.47943	51.55517	153.47943	51.55517
3200	160.12386	53.21734	160.12377	53.21734
3300	166.76131	54.87941	166.76129	54.87941
3400	173.06432	56.54139	173.06432	56.54139

1 [%] 이내로 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 어떤해석방법을 선택할 것인가는 해석의 종류, 해석식의 단순성, 해석을 위한 수치해석의 용이성, 계산시간의 장단등을 고려하여 해석자의 판단에 의해 결정할 문제이다.

저항부에하에서 정전압,정주파수를 유지하기 위한 회전수, 단자커패시턴스 및 자화리액턴스를 결정하기 위하여 Table 1의 발전기에서 공극전압과 여자리액턴스의 관계를 (15)식의 형식으로 표시하면 다음과 같다.

$$E = 120.337 + 19.15345X_m - 2.20253\,X_m^2 + 0.10980\,X_m^3 - 0.00216\,X_m^4$$

Table 4 Comparision of the loop method and the nodal method using Chan's data

Load Resistance [pu]	Loop method		Nodal method	
	Phase voltage [pu]	Frequency [pu]	Phase voltage [pu]	Frequency [pu]
0.8	0.40088	0.92180	0.40743	0.92122
1.0	0.78699	0.93333	0.78976	0.93265
1.2	0.88043	0.94161	0.88344	0.94095
1.4	0.93862	0.94785	0.94011	0.94724
1.6	0.96898	0.95273	0.97048	0.95217
1.8	0.99196	0.95664	0.99346	0.95614
2.0	1.01004	0.95986	1.01153	0.95940
2.2	1.02470	0.96254	1.02616	0.96213
2.4	1.03683	0.96482	1.03826	0.96444
2.6	1.04705	0.96677	1.04846	0.96642

전장에서 제시한 방법에 의하여 75 [Ω] 의 저항부하가 단자에 접속될때 단자전압 V = 130 [V] , 주파수 a = 1 [pu] 를 유지하기 위한 값들을 계산하기 위해서 초기추측값으로 회전수 b = 0.8 [pu] , 여자리액턴스 X_m = 15 [Ω] , 단자용량리액턴 X_c = 15 [Ω] 으로하여 계산하였다. 계산결과 b = 1.00194 [pu] X_m = 23.12329 [Ω] 및 X_c = 67.65020 [Ω] 을 얻었다.

이 결과치를 사용하여 절점해석법에 의하여 역으로 계산한 결과 V = 126.11427 [V] 와 a = 1 [pu] 를 얻었다.

즉, 전압은 2.989 [%] 의 오차가 있고 주파수는 0.0 [%] 의 오차를 보이므로 본 방법의 타

당성을 입증하고 있다.

Ⅳ. 結　論

풍력구동 자기여자 유도발전기의 정상상태 해석방법인 루우프 임피던스법과 절점 어드미턴스법을 비교 검토하였다. 그 결과 저항부하하에서 속도변화에 따른 해석과 저항부하변화에 따른 해석의 어떤경우에도 두 방법의 해석결과가 모두 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 어떤 해석법을 선택하여 발전기의 특성을 해석하는가는 해석의 종류, 해석식의 단순성, 해석을 위한 수치해석의 용이성, 계산시간의 장단등을 고려하여 해석자가 판단하여 결정하여야 한다.

그리고 저항부하에서 정전압, 정주파수를 유지하기 위한 회전수, 단자커패시턴스 및 자화리액턴스를 구하는 방법도 제시하여 이방법의 타당성을 보였다.

參考文獻

1. Bassett, E.D. and Potter, F.M., 1935, Capacitive excitation for induction generators, *AIEE Transactions*, Vol. 54, May, pp.540-545
2. Wagner, C.F., 1939, Self-excitation of induction motors, *AIEE Transactions*, Vol. 58, Februsry, pp.47-51
3. Murthy, S.S., Malik, O.P.and Tandon, A.K., 1982, Analysis of self-excited induction generators, *IEE PROC.*, Vol. 129, pt.C, No.6, pp.260-265
4. Raina, G. and Malik, O.P., 1983, Wind energy conversion using a self-excited induction generator, *IEEE Trans. P.A.S.*, Vol. PAS-102, No.12, pp.3933-3936
5. Tandon, A.K., Murthy, S.S. and Berg, G.J., 1984, Steady state analysis of capacitor self-excited induction generators, *IEEE Trans. P.A.S.*, Vol. PAS-103, No.3, pp.612-618
6. Malik, N.H. and Haque, S.E., 1986, Steady state analysis and performance of an isolated self-excited inductuion generator, *IEEE Trans. E.C.*, Vol. EC-1, No.3, pp.134-140
7. Quazene, L. and McPherson, G., 1983, Analysis of the isolatd induction generator, *IEEE Trans. P.A.S.*, Vol. PAS-102, No.8, pp.2793-2798
8. Chan, T.F., 1994, Steady-state analysis of self-excited induction generators, *IEEE Trans. E.C.*, Vol.9, No.2, pp.288-296

附　錄

(3)식의 계수

$p_1 = -RX_1X_2$

$p_2 = -R(X_1+X_2)$

$p_3 = -p_1$

$p_4 = -p_2$

$p_5 = RR_1R_2$

$p_6 = RX_2+R_2X_1+R_1X_2$

$p_7 = R+R_1+R_2$

$p_8 = -(R+R_1)X_2$

$p_9 = -(R+R_1)$

(4)식의 계수

$q_1 = R(X_1R_2+X_2R_1)$

$q_2 = X_1X_2$

$q_3 = X_1+X_2$

$q_4 = R(R_1+R_2)$

$q_5 = -RR_1X_2$

$q_6 = -q_2$

$q_7 = -q_3$

$q_8 = -RR_1$

$q_9 = -(R+R_1)R_2$

(11)식의 계수

$Q_1 = R^2(X_1^2R_2 + X_2^2R_1)$

$Q_2 = -bR^2(X_1^2R_2 + 2X_2^2R_1)$

$Q_3 = R^2R_2(R_1^2+R_1R_2-2X_1X_c) + X_c^2(X_1^2R_2+X_2^2R_3)+b^2X_2^2R^2R_1$

$Q_4 = R^2R_2b(2X_1X_c - R_1^2) - X_c^2b(X_1^2R_2+2X_2^2R_3)$

$Q_5 = X_c^2R_3(R_2R_3+b^2X_2^2+R_2^2)$

$Q_6 = -bX_c^2R_3^2R_2$

$R_3 = R_1+R$