

다양한 불평형 전압이 인가된 3상 유도전동기의 동적특성 분석

김태한\*, 좌종근\*\*

\*제주대학교 대학원, \*\*제주대학교 전기전자공학부

Analysis of Dynamic Characteristics of Three Phase Induction Motor Applied by Various Unbalanced Voltage

Tae-Han Kim\*, Chong-Keun Jwa\*\*

\*Graduate school, Cheju Nat'l Univ, \*\*Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Cheju Nat'l Univ.

**ABSTRACT** - The dynamic characteristics of a three phase induction motor which is applied by various unbalanced voltages are simulated and analyzed in this paper. The voltage equations and torque equation in the dq stationary reference frame for the three phase star connected induction motor are used in this analysis. MATLAB and SIMULINK are employed as a simulation tool. The dynamic characteristics of speed and torque are simulated for various unbalanced voltages, that is, (1) cases with the same unbalance voltage factor but different unbalanced voltages, (2) cases with only one unbalanced voltages but different degree of unbalance, and (3) cases with the same positive sequence voltage but different negative sequence voltages. The simulated results are compared and analyzed with each other, and also with the results of balanced voltage.

동특성을 시뮬레이션하고 이들의 결과들을 평형 전압이 인가된결과와는 물론 각 경우에 대해서도 서로 비교하여 분석한다.

2. 기초 방정식

3상 대칭 유도기의 동적 시뮬레이션을 하기 위한 권선의 접속은 Fig.1과 같다. 그림에서 보듯이 대부분의 경우 고정자와 회전자는 3선 시스템이고 농형의 경우 회전자권선은 3선 시스템과 등가로 볼 수 있으므로 4선 시스템은 고려하지 않는다.

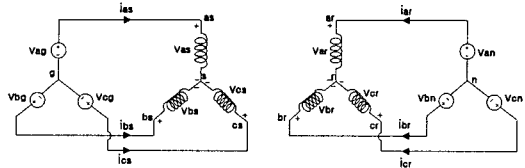


Fig.1 Stator and rotor connection of an induction machine

1. 서 론

3상 대칭 유도전동기는 평형 3상 전압으로 운전하는 것이 원칙이지만 실제로 배전선에 접속하여 사용할 때 전동기에 인가되는 단자전압은 불평형이 되는 것이 일반적이다. 이 때 전압 불평형의 정도는 보통 아주 적으므로 이것이 전동기에 미치는 영향은 적으나 불평형의 정도가 커지면 이에따라 영향도 커진다. 이의 영향으로 출력이 감소하고 동손의 증가로 온도가 상승하는 등 전동기 운전성능이 저하하게 된다.

이의 중요성에 따라 정상상태 해석으로 Williams<sup>[1]</sup>는 역상분 전류에 의한 손실의 변화와 불평형 전압으로 인한 부가손실의 전동기 부하변화에 따른 영향 등을 분석하였다. Linders<sup>[2]</sup>는 전동기 손실과 역상분 전압사이의 상관관계가 있으며 불평형 전압이 전동기 수명단축의 원인이 되는 것을 지적하였다. Lee<sup>[3]</sup>는 전동기의 실부하 시험을 통하여 다양한 불평형 전압이 인가될 때 전동기 성능에 미치는 영향을 조사하고 관련 규정, 전동기의 감소율, 그리고 온도상승 곡선이 전압 불평형율은 물론 정상분 전압이 크기도 기초가 되어야 함을 제시하였다.

동적 해석으로 Krause와 Thomas<sup>[4]</sup>는 dq 임의의 속도 좌표계로 표시한 대칭 유도기의 방정식을 사용하여 평형과 불평형 운전에 대한 2상과 3상 유도기의 동특성을 아날로그 컴퓨터로 시뮬레이션 하였다. Krause<sup>[5]</sup>는 고정자와 회전자 불평형 조건을 분리하여 고찰 하였고 불평형 비정현파의 전압이 고정자와 회전자에 인가될 때의 특성을 해석 하였다. Ong<sup>[6]</sup>은 dq 정지좌표계를 사용하여 유도기의 운전방식에 따른 동특성을 MATLAB/SIMULINK로 프로그래밍하여 시뮬레이션하였다.

그러나 이들의 연구에서는 불평형 전압인가시의 동특성은 시뮬레이션되어 있으나 다양한 불평형 전압이 인가된 경우에 대한 특성은 분석되어 있지 않다.

본 논문에서는 3상 성형결선된 대칭 3상 유도전동기에 대한 기초 방정식을 dq 정지좌표계로 구성하고 시뮬레이션 도구로 MATLAB/SIMULINK를 사용한다. 다양한 불평형 전압이 전동기에 인가된 경우에 대한 속도와 토오크의

이 그림에서  $V_{ag}, V_{bg}, V_{cg}$ 는 각상 고정자측 전원의 상전압을,  $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$ 는 각상 고정자 권선의 상전압을,  $V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$ 은 각상 회전자측 상전압을,  $V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$ 은 각상 회전자권선의 상전압을,  $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$ 는 각상 고정자측 상전류를, 그리고  $i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$ 은 각상 회전자측 상전류를 표시한다.

3상 인가전압  $V_{ag}, V_{bg}, V_{cg}$ 는 평형전압일 수도 있고 불평형전압이나 비정현파 전압일 수도 있다. 그림에서 3상 고정자 권선의 상전압은

$$\begin{aligned} V_{as} &= V_{ag} - V_{sg} \\ V_{bs} &= V_{bg} - V_{sg} \\ V_{cs} &= V_{cg} - V_{sg} \end{aligned} \tag{1}$$

이 되고, 여기서  $V_{sg}$ 는 고정자 권선 중성점과 고정자측 전원 중성점 사이의 전압이다. 3상 3선 시스템만 고려하고 있으므로 영상분 전류  $i_{os}$ 는 0이므로  $V_{sg} = 0$  이고 영상분 전압  $V_{os}$ 도 0로하여 기초방정식을 세운다.

고정자 전원의 상전압의 형태에 관계없이 정지 qd좌표계로 변환하면

$$\begin{aligned} V_{as}^s &= \frac{2}{3} V_{ag} - \frac{1}{3} V_{bg} - \frac{1}{3} V_{cg} \\ V_{ds}^s &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V_{bg} + V_{cg}) \end{aligned} \tag{2}$$

이 되고, 여기서 위첨자 s는 정지좌표계를 표시한다. 정지좌표계에서의 3상 대칭유도기의 전압방정식은

$$\begin{aligned} V_{as}^s &= r_s i_{as}^s + \frac{d}{dt} \psi_{as}^s \\ V_{ds}^s &= r_s i_{ds}^s + \frac{d}{dt} \psi_{ds}^s \end{aligned} \tag{3}$$

$$V_{qr}^s = r_r i_{qr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_{dr}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{qr}^s$$

$$V_{dr}^s = r_r i_{dr}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_{qr}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{dr}^s \quad (4)$$

으로 주어지고, 여기서  $r_s, r_r$  은 각각 고정자와 회전자 1상당 저항을,  $\omega_b$ 는 기준 전기각속도를,  $\Psi_{qs}, \Psi_{qr}$  은 각각 고정자와 회전자의 단위시간당 자속쇄교수의 횡축성분을,  $\Psi_{ds}, \Psi_{dr}$  은 각각 고정자와 회전자의 단위시간당 자속쇄교의 직축 성분을, 그리고 p는 시간 미분연산자로 d/dt를 표시한다. 그리고 prime(')은 회전자측을 고정자측으로 환산된 것을 나타낸다.  
각 좌표축 성분의 자속쇄교수는

$$\Psi_{qs}^s = x_{ls} i_{qs}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s)$$

$$\Psi_{ds}^s = x_{ls} i_{ds}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \quad (5)$$

$$\Psi_{qr}^s = x_{lr} i_{qr}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s)$$

$$\Psi_{dr}^s = x_{lr} i_{dr}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \quad (6)$$

으로 표시되고, 여기서  $x_{ls}, x_{lr}$  은 각각 고정자와 회전자의 1상당 누설리액턴스를, 그리고  $x_m$  은 여자리액턴스를 표시한다.  
고정자와 회전자사이의 단위시간당 상호 자속 쇄교수의 횡축성분과 직축성분을  $\Psi_{mq}$  와  $\Psi_{md}$ 이라 하면

$$\Psi_{mq} = x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s)$$

$$\Psi_{md} = x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \quad (7)$$

이 된다. 또한

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x_{lr}} \quad (8)$$

이러면 식 (5), (6) 과 식 (7) 로부터

$$\Psi_{mq} = x_m \left( \frac{\Psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\Psi_{qr}^s}{x_{lr}} \right)$$

$$\Psi_{md} = x_m \left( \frac{\Psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\Psi_{dr}^s}{x_{lr}} \right) \quad (9)$$

가 된다.

유도기의 발생토크는

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi_{ds}^s i_{qs}^s - \Psi_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (10)$$

로 주어지고, 여기서 P는 극수이다. 회전자의 운동방정식은

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_e + T_m - T_d \quad (11)$$

이며, 여기서 J는 회전자와 회전자와 연결된 부하의 합성 관성모멘트이고,  $\omega_{rm}$ 은 회전자의 기계 각속도이며, 그리고  $T_m$  과  $T_d$  는 각각 외부인가 기계적 토크와 제동토크이다. 이 식을  $\omega_r / \omega_b$  의 항이 포함 되도록 정리하면

$$\frac{2}{P} J \omega_b \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} = T_e + T_m - T_d \quad (12)$$

이 된다.

### 3. 시뮬레이션 및 분석

불평형 전압이 인가된 유도전동기의 동특성을 시뮬레이션 하기 위해 선정된 유도기는 정격전압 200[V], 출력 1[hp], 주파수 60[Hz], 그리고 극수 4극의 성형결선된 농형 유도기이다. 이 유도기의 정수는  $r_s = 3.35[\Omega]$ ,  $r_r = 1.99[\Omega]$ ,  $L_{ls} = L_{lr} = 6.94[mH]$ ,  $L_m = 163.73[mH]$ , 그리고  $J = 0.1[kgm^2]$ 이다. 이 값들을 가지고 기초방정식에서 dq 정좌표계로 표시한 전압 방정식과 토오크식을 이용하여 동특성 가운데 속도와 토오크 특성을 시뮬레이션하기 위하여 MATLAB/SIMULINK 로 프로그램 한다. SIMULINK에 의한 유도전동기 시뮬레이션에서의 변수들의 흐름을 Fig.2 에 보였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해서 Adams 법을 사용하고 최대와 최소 step size를 각각  $2 \times 10^{-2}$  와 Auto로 하고 허용오차는  $1 \times 10^{-6}$ 로 하였다.

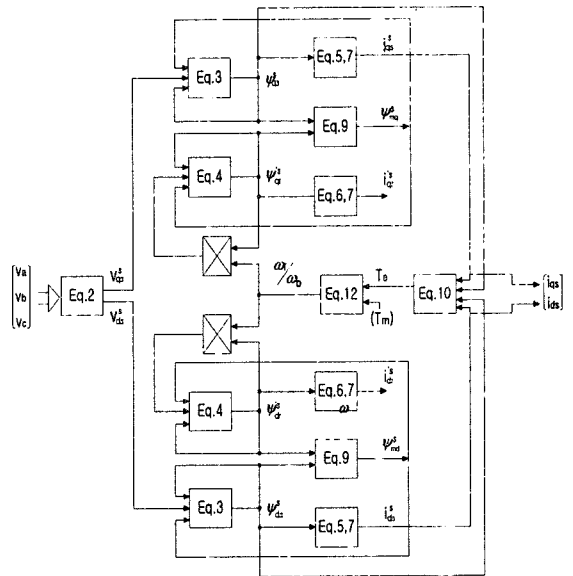


Fig.2 Flow of variables in induction motor simulation

전동기에 다양한 불평형 전압이 인가된 경우 즉, (1) 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우, (2) 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형율이 다른 경우, (3) 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우에 대한 시뮬레이션 결과 토오크의 최대치와 최소치, 그리고 기동시간(ts)을 각각 Table1, Table2, 그리고 Table3에 보였다. 이때 제동토크는 0으로 주었고 외부인가 기계적토크는 0인 경우와 기준토크의 1/2인 값으로 하였다. 그리고 전압불평형율(VUF)은 정상분 전압에 대한 역상분 전압의 비의 백분율로 정의한 IEC의 규정을 적용하였다

Table1에서 8가지의 기호는 각각

- 3Φ-UV : 3상 부족전압 불평형,
- 2Φ-UV : 2상 부족전압 불평형,
- 1Φ-UV : 1상 부족전압 불평형
- 2Φ-A : 2상 각변위 불평형
- 1Φ-A : 1상 각변위 불평형
- 1Φ-OV : 1상 과전압 불평형
- 2Φ-OV : 2상 과전압 불평형
- 3Φ-OV : 3상 과전압 불평형 의 경우를 의미한다.

Table 1. Comparison of starting time and min/max torque of 8 different unvalanced voltage cases

VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0		Tm = Th/2			
						ts(s)	Tem(N·m)	ts(s)	Tem(N·m)		
balanced	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	127.0	0	0.3957	-1.7108	20.3437	0.4741	-1.7474	20.3572
3Φ-UV	4 110.0 ∠ 0°	112.7 ∠ 240°	125.0 ∠ 120°	115.877	4.635	0.4739	-1.5292	16.9091	0.5935	-1.5706	16.9189
2Φ-UV	4 111.8 ∠ 0°	114.3 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	117.698	4.768	0.4601	-1.5837	17.4600	0.5713	-1.6238	17.4766
1Φ-UV	4 112.4 ∠ 0°	117.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	122.115	4.885	0.4280	-1.6292	18.7135	0.5223	-1.6538	18.7412
2Φ-A	4 127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 232.2°	127.0 ∠ 116.1°	126.788	5.092	0.3970	-1.6610	20.2568	0.4766	-1.7357	20.2747
1Φ-A	4 127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 113.1°	126.797	5.072	0.3975	-1.7269	20.2200	0.4772	-1.7791	20.2478
1Φ-OV	4 142.9 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	132.292	5.292	0.3649	-1.7752	22.0652	0.4311	-1.8564	22.0753
2Φ-OV	4 145.9 ∠ 0°	138.3 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	137.062	5.482	0.3406	-1.8271	23.5000	0.3973	-1.9230	23.6184
3Φ-OV	4 148.2 ∠ 0°	139.7 ∠ 240°	129.0 ∠ 120°	138.981	5.559	0.3315	-1.9019	24.3018	0.3845	-1.9805	24.3164
3Φ-UV	6 103.2 ∠ 0°	107.2 ∠ 240°	125.0 ∠ 120°	111.783	6.707	0.5104	-1.6414	15.6868	0.6506	-1.4871	15.6917
2Φ-UV	6 105.0 ∠ 0°	108.6 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	113.541	6.813	0.4945	-1.6977	16.2179	0.6562	-1.5226	16.2271
1Φ-UV	6 105.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	119.811	7.189	0.4450	-1.8945	18.0292	0.5482	-1.6121	18.0507
2Φ-A	6 127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 227.7°	127.0 ∠ 113.9°	126.515	7.591	0.3985	-2.1170	20.1068	0.4800	-1.6828	20.1193
1Φ-A	6 127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 109.8°	126.545	7.593	0.3997	-2.0947	20.0985	0.4803	-1.7422	20.1267
1Φ-OV	6 151.3 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	135.106	8.106	0.3509	-2.4081	22.9510	0.4107	-1.8965	22.9658
2Φ-OV	6 156.5 ∠ 0°	144.7 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	142.718	8.563	0.3148	-2.6943	25.5471	0.3622	-1.9799	25.5603
3Φ-OV	6 159.0 ∠ 0°	146.2 ∠ 240°	129.0 ∠ 120°	144.718	8.683	0.3063	-2.7593	26.3089	0.3507	-2.0434	26.3250

Table 1에서 보듯이 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우 기동시간은 부족전압 불평형인 경우는 불평형 상이 많을수록 평형전압 인가시 보다 긴시간으로 길어지며 과전압 불평형인 경우는 불평형 상이 적을수록 평형전압 인가시 보다 짧은시간으로 길어진다. 발생 토오크의 최소치도 근소한 차이로 이와같은 경향으로 커지고 있다. 발생 토오크의 최대치는 부족전압 불평형인 경우는 불평형 상이 적을수록 과전압 불평형인 경우는 불평형 상이 많을수록 커짐을 알 수 있다. 위상 변위를 갖는 경우는 1상 위상변위와 2상 위상변위 모두 비슷한 기동시간과 토오크의 최소치/최대치를 보이고 있다. 전압 불평형율이 다른 경우 기동시간은 부족전압 불평형일때는 불평형율이 크면 길어지고, 과전압 불평형일때는 불평형율이 작을 때 길어지며 위상변위를 갖는 경우는 거의 같다. 모든 경우에서 외부인가 기계토오크가 있을때가 없을 때 보다 기동시간이 길어지고 최대토오크도 커지고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Comparison of starting time and min/max torque of different VUF and 1Φ-UV unvalance cases

VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0		Tm = Th/2			
						ts(s)	Tem(N·m)	ts(s)	Tem(N·m)		
0	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	127.0	0	0.3957	-1.7108	20.3437	0.4741	-1.7474	20.3572
1	123.2 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	125.73	1.27	0.4037	-1.7237	19.9095	0.4882	-1.7697	19.9317
2	119.5 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	124.5	2.5	0.4118	-1.8804	19.5436	0.4978	-1.7408	19.5642
3	115.9 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	123.3	3.7	0.4195	-1.6733	19.1511	0.5096	-1.7275	19.1683
4	112.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	122.13	4.87	0.4208	-1.6292	18.7135	0.5223	-1.6538	18.7412
5	108.9 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	120.97	6.03	0.4367	-1.6441	18.4002	0.5349	-1.6988	18.4251
6	105.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	119.8	7.2	0.4450	-1.8945	18.0292	0.5482	-1.6121	18.0507
7	102.1 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	118.7	8.3	0.4540	-2.1645	17.6235	0.5616	-1.6343	17.6408

Table 3. Comparison of starting time and min/max torque of different VUF and same positive sequence voltage cases

VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0		Tm = Th/2			
						ts(s)	Tem(N·m)	ts(s)	Tem(N·m)		
0	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	127	0	0.3957	-1.7108	20.3437	0.4741	-1.7474	20.3572
1	129.2 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	124.8 ∠ 120°	127	1.27	0.3951	-1.7269	20.3534	0.4743	-1.7787	20.3683
2	131.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	122.6 ∠ 120°	127	2.54	0.3964	-1.7056	20.3475	0.4744	-1.7718	20.3635
3	133.6 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	120.4 ∠ 120°	127	3.81	0.3954	-1.6858	20.2965	0.4748	-1.7396	20.3058
4	135.8 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	118.2 ∠ 120°	127	5.08	0.3958	-1.5774	20.2912	0.4749	-1.7471	20.3086
5	138.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	116.0 ∠ 120°	127	6.35	0.3959	-1.7732	20.3117	0.4753	-1.7231	20.3248
6	140.2 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	113.8 ∠ 120°	127	7.62	0.3958	-2.1275	20.2469	0.4755	-1.6965	20.2628
7	142.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	111.6 ∠ 120°	127	8.9	0.3966	-2.4828	20.2652	0.4756	-1.7033	20.2772

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 1상만 불평형전압이고 전압 불평형율이 다른 경우 기동시간은 1상 전압이 작아질수록 기동시간이 평형전압 인가시 보다 긴시간으로 길어지고 발생 최대토오크는 작아지고 있다. 최소 토오크는 불규칙하게 변동하고 있다.

Table 3은 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우로 기동시간은 평형전압 인가시 보다 근소하게 작은시간으로 거의 변화가 없음을 알 수 있으며 최대토오크도 거의 변화가 없다. 최소토오크도 불규칙하게 변동하고 있다.

위의 두 경우 모두 외부인가 기계토오크의 변동에 관계없이 최대토오크의 값도 거의 일정함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

다양한 불평형 전압이 3상 유도전동기에 인가되었을때의 동특성을 시뮬레이션하여 분석하였다. 이 분석을 위하여 dq 정직좌표계에서의 3상 성형결선 유도전동기에 대한 전압방정식과 토오크식을 사용 하였다. 시뮬레이션 도구로 MATLAB/SIMULINK를 사용하고 다양한 불평형 전압이 인가된 경우 즉, (1) 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우, (2) 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형율이 다른 경우, 그리고 (3) 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우에 대한 속도와 토오크 동특성을 시뮬레이션 하였다. 이들의 결과를 평형전압이 인가된 경우의 결과는 물론 각각의 경우에 대해서 비교하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 부족전압 불평형인 경우 평형전압인 경우보다 기동시간이 길어지고 최대토오크도 커지며 과전압 불평형인 경우는 이와 반대이다.
- 2) 불평형의 종류에 관계없이 정상분 전압이 클 수록 기동시간이 길어지고 정상분 전압이 같으면 기동시간도 같아진다.
- 3) 정상분 전압이 클 수록 발생 최대토오크도 커진다.
- 4) 외부인가 기계토오크가 크면 기동시간은 더 길어지고 최대토오크는 거의 영향을 받지 않는다.
- 5) 위상변위는 1상이나 2상 위상변위의 경우 기동시간과 최대토오크에 거의 영향을 주지 않는다.
- 6) 최소토오크는 전압 불평형율이 같은 경우를 제외하고 특별한 규칙성이 없다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J.E.Williams, 1954, Operation of Three-Phase Induction Motors on Unbalanced Voltages, AIEE Trans., Vol.73, PP. 125-133.
- [2] J.R.Linders, 1972, Effects of Power Supply Variations on AC Motor Characteristics, IEEE Trans. on IA, Vol.IA-8, No.4, PP. 383-400.
- [3] C.Y.Lee, 1999, Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor, IEEE Trans. on EC, Vol.14, No.2, PP. 202-208.
- [4] P.C.Krause and C.H.Thomas, 1965, Simulation of Symmetrical Induction Machinery, IEEE trans. on PAS, Vol. PAS-84, No.11, PP. 1038-1053.
- [5] P.C.Krause, 1987, Analysis of Electric Machinery, 2nd ed, McGraw-Hill Book co.
- [6] C.M.Ong, 1998, Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice Hall PTR.