

동일 전압불평형을 상태에서 유도전동기의 불평형전류 분석

김태한* · 좌종근**

Analysis of Unbalanced Currents of Induction Motor under Same Voltage Unbalance Factor Condition.

Tae-Han Kim* · Chong-Keun Jwa**

ABSTRACT

The unbalanced currents of an induction motor which is applied by various unbalanced voltages are analyzed under same unbalance voltage factor condition. The current unbalance factors of full load, a half load, and no load of the motor are computed with the unbalanced currents of transient and steady state. For these computation, the dynamic equations of the motor operation are derived by the dq coordinate system and simulated using MATLAB/SIMULINK. It is found that the unbalance rate and condition of currents are different between the transient and steady state.

Key Word : Unbalanced current, Induction motor, Dynamic equation, Same voltage unbalance factor.

I. 서론

3상 유도전동기 운전에 대한 불평형 선간전압의 주영향은 손실의 증가와 불평형 선전류이다. 토오크의 감소와 슬립의 증가도 나타나지만 이들의 영향은 전력계통에서 보통 경험하는 전압 불평형의 크기에 대하여 아주 적다. 전압이 충분히 불평형이 되면 낮은 효율과 과열을 일으킨다[1].

이와 같은 불평형 전압운전의 영향을 분석하기 위하여 많은 연구들이 1950년대 부터 수행되고 있다.

Williams[1]는 선간전압의 적은 불평형은 더 큰 선전류 불평형의 원인이 되고, 선전류가 크게 불평형이 될 때 전동기에 적당한 보호장치를 제공하는 것이 어렵다는 것을 밝혔다. Rao 와 Rao[2]는 평형 전압 조건에서의 정격부하에 대한 불평형 조건에서 허용가능한 부하의 비로 재정격 계수를 정의하여 분석하였다. Linders[3]는 불평형의 근본원인에 상관없이 역상분 손실이 전동기 단자에서의 역상분 전압에 밀접한 관계가 있음을 보였다. Woll[4]은 불평형 전압 운전 시 과열과 출력 토오크의 감소 등과 같은 영향이 전압 불평형의 정도에 직접적으로 비례함을

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소

Faculty of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.

보였다. Lee[5]는 다양한 불평형 전압 인가시 유도전동기의 실부하 시험으로 제 특성을 분석하였고, Wang[6]은 전압 불평형률의 확장으로 정상분 전압 폐이저에 대한 역상분 전압 폐이저의 비로 정의되는 복소전압 불평형률을 사용하여 정상상태 운전시의 해석적 방법을 제시하였다. 정과 좌[7]는 다양한 불평형 전압 인가시 정상상태의 불평형 전류를 분석하였고, 김과 좌[8]는 전동기의 동특성을 해석하였다. 그러나 지금까지의 연구에서는 과도기간동안이나 정상상태에서의 부하변화에 따른 전류 불평형 정도에 대한 분석은 되어있지 않다.

본 논문에서는 동일한 전압 불평형률 상태에서 다양한 불평형 전압이 인가된 경우에 대한 과도상태와 정상상태에서 부하변화에 따른 전류의 동특성을 MATLAB/SIMULINK로 시뮬레이션하고 전류 불평형률을 계산하여 분석하고자 한다.

II. 해석 이론

2.1 불평형률

불평형 단자전압 인가시의 3상 불평형 전압과 전류의 불평형 정도를 표현하는 전압과 전류 불평형률은 다음과 같은 IEC(international electro-technical commission)의 규정을 적용한다.

- 전압 불평형률(voltage unbalance factor)

$$VUF(\%) = \frac{\text{역상분전압}}{\text{정상분전압}} \times 100 \quad (1)$$

- 전류 불평형률(current unbalance factor)

$$CUF(\%) = \frac{\text{역상분전류}}{\text{정상분전류}} \times 100 \quad (2)$$

이 규정을 적용하기 위해서는 불평형 전압과

전류의 폐이저가 주어져야한다. 본 논문에서는 다양한 불평형 전압 폐이저가 주어진 상태에서 전류 불평형 정도를 분석하고자 유도전동기의 동특성 방정식으로부터 불평형 전류를 구한다. 이 불평형 전류의 크기는 쉽게 파악되지만 위상의 파악은 어렵다. 그러므로 불평형 전류의 크기만으로 전류 불평형률을 계산하여야 한다.

복소 전류 불평형률 k_c 를 정상분 전류 폐이저 I_1 에 대한 역상분 전류 폐이저 I_2 의 비로 정의하면

$$k_c = \frac{I_2}{I_1} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \exp(j\theta_c) = |k_c| \exp(j\theta_c) \quad (3)$$

가 되고, 여기서 θ_c 는 역상분 전류와 정상분 전류의 위상차이다.

3상 불평형 전류 폐이저와 대칭분 전류 사이의 관계는 영상분 전류를 무시하면

$$\begin{aligned} I_a &= I_1 + I_2 \\ I_b &= a^2 I_1 + a I_2 \\ I_c &= a I_1 + a^2 I_2 \end{aligned} \quad (4)$$

과 같다. 또한, 식 (3)으로부터

$$I_2 = |k_c|^2 I_1 \exp(j\theta_c) \quad (5)$$

으로하고 이것을 식 (4)에 대입하여 크기만의 식으로 정리하면

$$\begin{aligned} |I_a|^2 &= |I_1|^2 (1 + |k_c|^2 + 2|k_c| \cos \theta_c) \\ |I_b|^2 &= |I_1|^2 (1 + |k_c|^2 - |k_c| \cos \theta_c + \sqrt{3}|k_c| \sin \theta_c) \\ |I_c|^2 &= |I_1|^2 (1 + |k_c|^2 - |k_c| \cos \theta_c - \sqrt{3}|k_c| \sin \theta_c) \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다. 이식은 $|I_a|$, $|I_b|$, $|I_c|$ 가 기지의 불평형 전류이므로 연립하여 풀면 $|I_1|$, θ_c , 그리고 $|k_c|$ 를 구할 수 있다.

2.2 불평형 전류 해석

3상 대칭유도기의 동적 시뮬레이션을 하기 위한 고정자 권선은 Y결선으로 가정하고, 3상 3선 식으로 전압이 공급된다면 영상분 전류는 0이고, 영상분 전압도 0으로한다.

불평형 고정자 3상 전압을 V_{as}, V_{bs}, V_{cs} 라 하고 정지 qd좌표계로 변환하면

$$\begin{aligned} V_{qs}^s &= \frac{2}{3} V_{as} - \frac{1}{3} V_{bs} - \frac{1}{3} V_{cs} \\ V_{ds}^s &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V_{bs} + V_{cs}) \end{aligned} \quad (7)$$

이 되고, 여기서 위첨자 s는 정지좌표계를 표시하고, V_{qs}^s, V_{ds}^s 는 각각 고정자의 횡축 및 직축 성분 전압이다.

정지 좌표계에서 3상 대칭유도기의 전압 방정식은

$$V_{qs}^s = r_s i_{qs}^s + \frac{d}{\omega_b} \Psi_{qs}^s \quad (8)$$

$$V_{ds}^s = r_s i_{ds}^s + \frac{d}{\omega_b} \Psi_{ds}^s$$

$$V_{qr}^s = r_r i_{qr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_{dr}^s + \frac{d}{\omega_b} \Psi_{qr}^s \quad (9)$$

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

으로 주어지고, 여기서 r_s, r_r 은 각각 고정자와 회전자 1상당 저항을, ω_b 는 기준 전기각속도를, V_{qr}, V_{dr} 는 각각 회전자의 횡축과 직축 전압성분을, i_{qs}^s, i_{ds}^s 는 각각 회전자의 횡축과 직축 전류성분을, 그리고 prime(')은 회전자측을

고정자측으로 환산된 것을 표시한다. 또한, Ψ_{qs}, Ψ_{qr} 은 각각 고정자와 회전자의 단위시간당 자속쇄교수의 횡축성분을, Ψ_{ds}, Ψ_{dr} 은 각각 고정자와 회전자의 단위시간당 자속쇄교수의 직축 성분을, 그리고 p는 시간 미분연산자로 d/dt를 표시한다.

각 좌표축 성분의 자속쇄교수는

$$\begin{aligned} \Psi_{qs}^s &= x_{ls} i_{qs}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \\ \Psi_{ds}^s &= x_{ls} i_{ds}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{qr}^s &= x_{lr} i_{qr}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \\ \Psi_{dr}^s &= x_{lr} i_{dr}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \end{aligned} \quad (11)$$

으로 표시되고, 여기서 x_{ls}, x_{lr} 은 각각 고정자와 회전자의 1상당 누설리액턴스를, 그리고 x_m 은 자화리액턴스를 표시한다.

유도기의 발생 토오크는

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi_{ds}^s i_{qs}^s - \Psi_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (12)$$

로 주어지고, 여기서 P는 극수이다. 회전자의 운동방정식은

$$\frac{2}{P} J \omega_b \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) = T_e + T_m - T_d \quad (13)$$

이며, 여기서 J는 회전자측에서 본 합성 관성모멘트이고, ω_r 은 회전자의 각속도이며, 그리고 T_m 과 T_d 는 각각 외부인가 기계적 토오크와 제동 토오크이다.

이상의 식들을 조합하여 풀면 고정자 상전류의 횡축과 직축성분 i_{qs} 와 i_{ds} 가 구해지고, 이로부터 다음과 같은 고정자 불평형 3상 전류 i_{as} , i_{bs} , i_{cs} 를 계산할 수 있다

$$\begin{aligned} i_{as} &= i_{qs}^s \\ i_{bs} &= -\frac{1}{2}i_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^s \\ i_{cs} &= -\frac{1}{2}i_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^s \end{aligned} \quad (14)$$

III. 시뮬레이션 및 분석

동일한 전압 불평형을 상태에서 다양한 불평형 전압이 인가된 유도전동기의 불평형 전류를 시뮬레이션 하기 위해 선정된 유도는 정격전압 200[V], 출력 1[hp], 주파수 60[Hz], 그리고 극수 4극의 Y결선된 농형 유도기이다. 이 유도기의 회로정수는 $r_s = 3.35[\Omega]$, $r_r = 1.99[\Omega]$, $L_s = L_{lr} = 6.94[\text{mH}]$, $L_m = 163.73[\text{mH}]$, 그리고 $J = 0.1[\text{kgm}^2]$ 이다. 불평형 전류의 해석을 위하여 MATLAB/SIMULINK로 프로그래밍하여 전동기의 부하를 무부하, 1/2부하, 그리고 전부하로 변화시켰을 때 과도상태와 정상상태에서의 불평형 정도를 분석하기 위하여 전류 불평형률을 계산하였다.

Table 1은 동일한 전압불평형률, 즉 4[%]와 6[%]에서의 8가지 전압 불평형의 경우를 보이고 있다. 이 표에서 8가지의 기호는 각각

- 3 ϕ -UV : 3상 부족전압 불평형
- 2 ϕ -UV : 2상 부족전압 불평형
- 1 ϕ -UV : 1상 부족전압 불평형
- 2 ϕ -A : 2상 각변위 불평형
- 1 ϕ -A : 1상 각변위 불평형
- 1 ϕ -OV : 1상 과전압 불평형
- 2 ϕ -OV : 2상 과전압 불평형
- 3 ϕ -OV : 3상 과전압 불평형의 경우이다.

Table 1. Comparison of voltage unbalance factors in the eight voltage unbalance cases

cases	VUF [%]	Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	V1 [V]	V2 [V]
balanced	0	127.0 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	127.0	0
3 ϕ -UV	4	110.1 \angle 0 $^\circ$	112.6 \angle 240 $^\circ$	125.1 \angle 120 $^\circ$	115.933	4.639
2 ϕ -UV	4	111.8 \angle 0 $^\circ$	114.2 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	117.699	4.718
1 ϕ -UV	4	112.3 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	122.100	4.900
2 ϕ -A	4	127.0 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 231.9 $^\circ$	127.0 \angle 116 $^\circ$	126.789	5.073
1 ϕ -A	4	127.0 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 113.1 $^\circ$	126.795	5.095
1 ϕ -OV	4	142.9 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	132.300	5.300
2 ϕ -OV	4	145.9 \angle 0 $^\circ$	138.3 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	137.067	5.491
3 ϕ -OV	4	148.6 \angle 0 $^\circ$	138.9 \angle 240 $^\circ$	129.3 \angle 120 $^\circ$	138.933	5.571
3 ϕ -UV	6	103.1 \angle 0 $^\circ$	107.3 \angle 240 $^\circ$	125.0 \angle 120 $^\circ$	111.800	6.710
2 ϕ -UV	6	105.0 \angle 0 $^\circ$	108.6 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	113.533	6.813
1 ϕ -UV	6	105.4 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	119.800	7.200
2 ϕ -A	6	127.0 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 227.7 $^\circ$	127.0 \angle 113.9 $^\circ$	126.513	7.612
1 ϕ -A	6	127.0 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 109.7 $^\circ$	126.544	7.600
1 ϕ -OV	6	151.3 \angle 0 $^\circ$	127.0 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	135.100	8.100
2 ϕ -OV	6	156.5 \angle 0 $^\circ$	144.7 \angle 240 $^\circ$	127.0 \angle 120 $^\circ$	142.733	8.573
3 ϕ -OV	6	159.0 \angle 0 $^\circ$	146.2 \angle 240 $^\circ$	129.0 \angle 120 $^\circ$	144.733	8.691

Table 1의 각 전압으로 유도전동기를 운전할 때, 전동기의 부하를 변화시키면서 계산한 과도상태와 정상상태에서의 순시 최대전류와 전류불평형률을 각각 Table 2와 3에 보였다.

Table 2의 과도전류에 의한 전류 불평형률은 이 과도전류가 완전한 정형과가 아니므로 IEC 규정을 적용시킬 수 없지만, 순시 정현과로 가정하여 최대치로 불평형률을 계산하였다. 표에서 보듯이 전류 불평형률은 4[%]와 6[%]의 전압 불평형률의 어느 경우에서나 부하변동에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 전압 불평형률의 차이만큼 전류 불평형률도 차이가 있다. 부족전압 불평형일 때가 과전압 불평형일 때 보다 불평형 정도가 크다. 부족전압 불평형인 경우에는 1상 부족전압 불평형일 때가 불평형률이 크다. 과전압 불평형인 경우에는 1상 과전압 불평형일 때가 불평형률이 작다. 위상변위 불평형인 경우에는 1상 위상 불평형일 때가 불평형률이 크다.

Table 2. Comparison of transient unbalanced max/min currents of 8 different unbalanced voltages under various loads

VUF [%]	cases	full load				half load				no load			
		i_a [A]	i_b [A]	i_c [A]	CUF [%]	i_a [A]	i_b [A]	i_c [A]	CUF [%]	i_a [A]	i_b [A]	i_c [A]	CUF [%]
4	3 ϕ -UV	-22.0378	23.5075	-24.4670	6.0	-21.9853	23.4850	-24.4642	6.2	21.9386	23.4627	-24.4614	6.3
	2 ϕ -UV	-22.3681	23.8497	-24.8344	6.0	22.3148	23.8270	-24.8316	6.2	22.2791	23.8043	-24.8287	6.2
	1 ϕ -UV	22.8572	25.6190	-25.3943	7.1	22.8024	25.5945	-25.3910	7.2	22.7728	25.5701	-25.3877	7.2
	2 ϕ -A	-25.1976	26.4628	-24.8711	3.8	-25.1446	26.4358	-24.8669	3.8	25.1667	26.4089	-24.8628	3.7
	1 ϕ -A	23.8317	26.9479	-25.9080	7.1	23.7942	26.9228	-25.9051	7.2	23.8243	26.8978	-25.9021	7.0
	1 ϕ -OV	26.8168	26.6245	-26.1858	1.4	26.7620	26.5973	-26.1823	1.3	26.7226	26.5702	-26.1788	1.2
	2 ϕ -OV	27.5784	28.2559	-26.7487	3.2	27.5368	28.2287	-26.7448	4.0	27.4804	28.2016	-26.7410	4.0
	3 ϕ -OV	28.0123	28.5097	-27.1547	2.8	27.9691	28.4820	-27.1508	2.8	27.9198	28.4543	-27.1470	2.7
6	3 ϕ UV	20.9596	22.6110	-24.0458	7.9	20.9076	22.5891	-24.0433	8.1	20.8755	22.5672	-24.0407	8.1
	2 ϕ UV	21.3100	22.9223	-24.4182	7.9	21.2572	22.9001	-24.4159	8.0	21.2265	22.8778	-24.4131	8.1
	1 ϕ -UV	21.9643	25.3980	25.2157	9.0	21.9096	25.3762	-25.2125	9.2	21.8723	25.3543	25.2093	9.2
	2 ϕ -A	25.3837	26.6085	24.3887	5.1	25.3453	26.5779	-24.3832	5.0	25.3887	26.5515	-24.3778	5.0
	1 ϕ -A	23.3867	27.3139	25.9915	9.0	23.3412	27.2871	-25.9876	9.0	23.3937	27.2603	-25.9836	8.8
	1 ϕ -OV	27.9038	26.9006	-26.4198	3.2	27.8489	26.8727	-26.4154	3.1	27.8082	26.8449	-26.4110	3.1
	2 ϕ -OV	29.1879	29.4498	-27.2990	4.7	29.1308	29.4223	-27.2949	4.6	29.0735	29.3947	-27.2908	4.5
	3 ϕ -OV	29.6175	29.8094	-27.6974	4.6	29.5596	29.7814	-27.6933	4.5	29.5015	29.7534	-27.6892	4.4

Table 3. Comparison of steady unbalanced max/min currents of 8 different unbalanced voltages under various loads

VUF [%]	cases	full load				half load				no load			
		i_a [A]	i_b [A]	i_c [A]	CUF [%]	i_a [A]	i_b [A]	i_c [A]	CUF [%]	i_a [A]	i_b [A]	i_c [A]	CUF [%]
4	3 ϕ UV	3.5729	4.2703	5.2171	22.8	2.5858	2.7150	3.9815	32.7	2.6889	1.7929	3.4439	38.6
	2 ϕ -UV	3.5495	4.2226	5.2106	23.4	2.6194	2.7082	4.0153	33.1	2.7380	1.8119	3.4941	38.7
	1 ϕ -UV	3.1916	4.9424	4.6548	24.7	2.0459	3.5893	3.7903	33.8	1.9468	2.7581	3.6547	38.8
	2 ϕ -A	4.9074	4.6537	3.1044	25.8	3.6468	3.8915	2.0716	34.4	2.8708	3.7896	2.0167	38.6
	1 ϕ -A	3.4004	5.1850	4.1177	25.9	2.1575	4.0276	3.4493	34.6	1.7129	3.3748	3.5194	38.7
	1 ϕ -OV	5.2440	3.5805	3.8172	27.2	4.3055	3.0335	2.5969	35.1	3.8613	3.2301	1.9262	38.6
	2 ϕ -OV	5.1380	4.3161	3.1360	28.3	4.1230	3.8124	2.1409	35.5	3.5244	3.8950	1.8946	38.6
	3 ϕ -OV	5.1991	4.2032	3.2019	28.7	4.2347	3.7520	2.1955	35.7	3.6805	3.8673	1.8828	38.6
6	3 ϕ UV	3.3201	4.4947	5.7003	32.3	2.3912	2.7541	4.3818	47.8	2.7478	1.4993	3.7802	58.0
	2 ϕ UV	3.3148	4.4073	5.7021	33.1	2.4596	2.7071	4.4219	48.4	2.8265	1.4853	3.8261	58.0
	1 ϕ -UV	2.7652	5.3746	4.9391	35.9	1.5426	3.9062	4.1306	49.9	1.6671	2.8834	4.0717	58.2
	2 ϕ -A	5.3336	4.9767	2.5907	38.6	3.9979	4.3219	1.5575	51.4	3.0527	4.2933	1.7519	58.0
	1 ϕ -A	3.1234	5.7103	4.1863	38.6	1.7499	4.5050	3.6953	51.4	1.1819	3.7539	3.9229	57.9
	1 ϕ -OV	5.8346	3.4341	3.7464	41.6	4.9336	3.1673	2.4460	53.0	4.4594	3.5871	1.5494	57.9
	2 ϕ -OV	5.7161	4.6258	2.6081	44.1	4.7203	4.3580	1.5992	53.9	4.0473	4.5673	1.4231	58.0
	3 ϕ -OV	5.7502	4.6111	2.6143	44.6	4.7934	4.3779	1.6207	54.1	4.1449	4.6024	1.4176	58.0

Table 3의 정상상태에서의 불평형 전류는 정현파 전류이므로 IEC규정을 적용시킬 수 있다.

표에서 보듯이 전류 불평형률은 부하가 작을 수록 커지고 있음을 알 수 있다. 부하시 전류 불평형률은

과전압 불평형, 위상 불평형, 부족전압 불평형 순으로 작아지고 있다. 무부하시에는 모든경우의 전류 불평형률이 거의 같다. 전류 불평형률은 전압 불평형률보다 5-10배 정도 큰 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서 보듯이 과도상태와 정상상태에서의 전류 불평형의 정도와 양상이 같지 않음을 알 수 있다.

IV. 결 론

동일한 전압 불평형을 상태의 다양한 불평형 전압이 유도전동기에 인가되었을 때의 불평형 전류를 분석하였다. 전류 불평형률은 전동기의 전부하, 1/2부하, 그리고 무부하시의 과도상태와 정상상태에서의 불평형 전류로부터 계산하였다. 이를 위하여 qd좌표계에서 유도전동기의 동적 방정식을 구성하고 MATLAB /SIMULINK로 시뮬레이션하여 분석하였다. 그 결과 과도상태와 정상상태에서의 전류 불평형의 정도와 양상이 같지 않음을 알 수 있었다.

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] N.R. Rao and P.A.D.J. Rao, 1972, Rerating Factors of Polyphase Induction Motor under Unbalanced Line Voltage Conditions, IEEE Trans. on PAS, Vol.IA-8, No.4, PP.383-400.
- [3] 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.
- [4] R.F. Woll, 1975, Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors, IEEE Trans. on IA, Vol.IA-11, No.1, PP.38-42.
- [5] 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.
- [6] Y.J. Wang, 2001, Analysis of Effects of

Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor, IEEE Trans. on EC, Vol.16, No.3, PP.270-275.

- [7] 정재훈, 좌종근, 2001, 불평형 전압이 인가된 3상 유도 전동기의 불평형 전류 분석, 제주대학교 첨단기술연구소 논문집, 제 12 권, 2호, PP.201-206.
- [8] 김태한, 좌종근, 2003, 다양한 불평형 전압이 인가된 3상 유도전동기의 동적특성 분석, 제주대학교 첨단기술 연구소 논문집, 제 14 권, 2호, PP.74-81.