

불평형전압이 인가된 3상 유도전동기의 불평형전류 분석

정재훈* · 좌종근**

Analysis of Current Unbalance on Three Phase Induction Motors Applied by Unbalanced Voltage

Jeon-Hoon Jung* and Chong-Keun Jwa**

ABSTRACT

The unbalanced currents and the input powers on three phase induction motors applied by the unbalanced voltages are analyzed. For this analysis, a real load test on the motor is performed under the specified unbalanced voltage, and applicability of the T type equivalent circuit which is used to analyze them is proved by comparing the tested results with computed results. With various unbalanced voltage patterns, including 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 currents and the powers are computed and analyzed by using this equivalent circuit.

Key Words : induction motor, unbalanced voltages, unbalanced currents

1. 서론

불평형 전압의 원인은 첫째, 계통에 큰 단상부하가 접속될 때로 고 유도성부하나 저항부하인 경우, 역률 개선용 커패시터의 하나의 퓨우즈가 용단된 경우, 배전공급 회로에서 1상이 개방된 경우가 있으며 둘째,

계통의 각상에 불균등 임피던스에 의한 것으로 넓은 범위에 연가되지 않은 경우, 개방 델타결선 변압기를 사용한 경우가 있다.^[1] 불평형 전압이 3상유도전동기에 인가되면 이 전압에 의한 전동기의 전류증가, 손실증가, 온도상승, 그리고 출력감소 등 전동기의 성능을 저하시킨다. 이에 따라 Williams^[2]는 기준전압에 대한 합이나 차로 대표되는 2개의 불평형 계수를 사용하여 다양한 전압패턴에 따른 전류와 손실을 T형 등가회로에 의하여 해석하였다. Rao와 Rao^[3]는 실험에 의하여 전류 불평형율에 따른 재 정격계수의 결정 방법을 제시하였다. Linders^[1]는 NEMA규정에 의한

* 제주대학교 산업대학원

Graduate School of Industry, cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소

Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Research Institute of Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

전압 불평형율을 사용하여 불평형의 원인과 영향을 분석하였다. Woll^[4]은 NEMA의 전압 불평형율을 사용하여 전압의 크기가 다르고 위상이 같은 경우와 크기와 위상이 다른 경우에 대한 분석과 불평형 전압 인가시의 속도-토크특성과 2차동손에 대하여 검토하였다. Lee^[5]는 일부하 실험을 통하여

- (1) 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우
- (2) 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형율이 다른 경우
- (3) 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우에 대하여 효율, 역율, 손실, 그리고 온도상승 등을 분석하였다.

그러나 Williams^[2]는 제한된 불평형 전압 패턴하에서 불평형 전류를 해석하였고 Lee^[5]는 발생 가능한 불평형 전압 패턴하에서의 특성을 실험에 의하여 분석하였으나 불평형 전류의 분석은 되어있지 않다. 따라서 본 논문에서는 3상유도전동기의 불평형 전류는 보호장치동작에 관계되고 입력전력은 운전경비계산에 필요하므로 이들을 분석한다. 분석을 위하여 특정한 불평형 전압 인가시의 3상유도전동기의 부하실험을 하고 그 결과와 T형 등가회로에 의한 계산결과를 비교하여 등가회로에 의한 해석의 타당성을 검토한다. 그리하여 T형 등가회로에 의하여 Lee^[5]의 다양한 불평형 전압 패턴에 의한 불평형 전류와 입력을 계산하여 분석하고자 한다.

II. 해석이론

2.1 전압 불평형율

3상 계통에서 전압 불평형은 선간전압이나 상전압이 다르거나 평형조건으로부터 위상각이 다를때 또는 위 두가지가 결합되어 나타난다. 이에 따라 3상불평형 정도를 표현하는 전압 불평형율의 정의는 다음과 같다.^{[5][6][7]}

- 1) NEMA (National Electrical Manufacturers Association)의 정의

선간전압 불평형율(line voltage unbalance rate)

$$LVUR(\%) = \frac{\text{평균선간전압에 대한 최대전압편차}}{\text{평균선간전압}} \times 100$$

- 2) IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)의 정의

상전압 불평형율(phase voltage unbalance rate)

$$PVUR(\%) = \frac{\text{평균상전압에 대한 최대전압편차}}{\text{평균상전압}} \times 100$$

- 3) IEC (International Electrotechnical Commission)의 정의

전압 불평형율 (voltage unbalance factor)

$$VUF(\%) = \frac{\text{역상분 전압 성분}}{\text{정상분 전압 성분}} \times 100$$

이상의 정의들은 전압의 크기만으로 정의되었으나 다음과 같은 위상까지 고려한 복소 전압 불평형율 (complex voltage unbalance factor)도 사용되고 있다.

$$CVUF = \frac{\text{역상분 전압 페이저}}{\text{정상분 전압 페이저}}$$

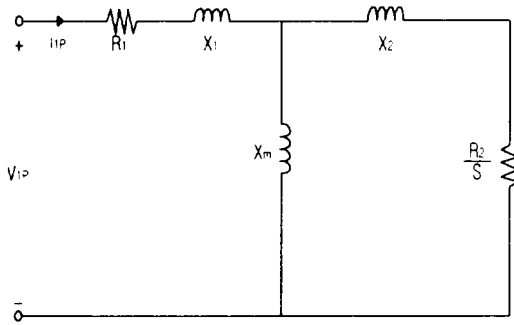
본 논문에서는 전압 불평형율과 전류 불평형율을 사용하여 해석한다.

2.2 불평형 전류해석

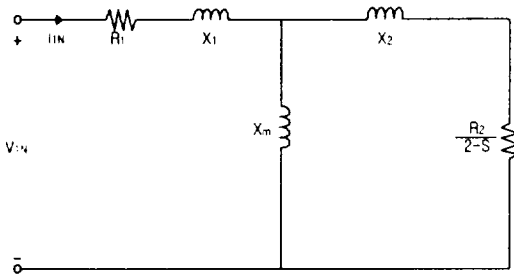
불평형 단자전압 인가시의 유도전동기의 등가회로는 Fig. 1과 같다. 이때 인가전압은 다음과 같이 대칭 좌표법에 의한 대칭분으로 분해 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{iP} \\ V_{iN} \\ V_{iO} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 식에서 첨자 P, N, O는 각각 정상분, 역상분, 영상분을 나타내고 $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이다.



a) positive sequence



b) negative sequence

Fig. 1. Equivalent circuits.

등가회로에서 R과X는 권선저항과 권선누설리액턴스를 그리고 첨자 1,2,m은 각각 고정자, 회전자, 여자회로를 대표하고 있다.

고정자회로의 정,역상분 임피던스를 Z_{1P} , Z_{1N} 그리고 여자회로의 정,역상분 임피던스를 Z_{mP} , Z_{mN} 이라 하면

$$Z_{1P} = Z_{1N} = R_1 + jX_1 \quad (2)$$

$$Z_{mP} = Z_{mN} = jX_m \quad (3)$$

이고, 회전자회로의 정,역상분 임피던스 Z_{2P} , Z_{2N} 는

$$Z_{2P} = \frac{R_2}{S} + jX_2 \quad (4)$$

$$Z_{2N} = \frac{R_2}{2-S} + jX_2 \quad (5)$$

이다. 또한 입력 정,역상분 임피던스를 Z_P , Z_N 이라하면

$$Z_P = Z_{1P} + \frac{Z_{mP} \cdot Z_{2P}}{Z_{mP} + Z_{2P}} \quad (6)$$

$$Z_N = Z_{1N} + \frac{Z_{mN} \cdot Z_{2N}}{Z_{mN} + Z_{2N}} \quad (7)$$

이므로 입력 정, 역상분 전류 I_{1P} , I_{1N} 은

$$I_{1P} = \frac{V_{1P}}{Z_P} \quad (8)$$

$$I_{1N} = \frac{V_{1N}}{Z_N} \quad (9)$$

이다. 그러므로 식(8)과(9)로부터 불평형 상전류, 입력, 그리고 전류 불평형율을 구하면 다음과 같다.

• 불평형 상전류

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_{1P} + I_{1N} \\ I_b &= a^2 I_{1P} + a I_{1N} \\ I_c &= a I_{1P} + a^2 I_{1N} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

• 복소입력

$$\begin{aligned} S &= 3V_{1P}I_{1P}^* + 3V_{1N}I_{1N}^* \\ &= P + jQ \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 P와Q는 유효전력과 무효전력이다.

• 전류불평형율

$$CUF(\%) = \frac{|I_{1N}|}{|I_{1P}|} \times 100 \quad (12)$$

III. 해석결과 및 분석

유도전동기의 불평형 전류 해석을 위하여 (1) 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우 (2) 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형율이 다른 경우 (3) 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우에 대하여 분석한다.

분석에 사용한 전동기는 정격전압 208(V), 전류 1.3(A), 출력178(W), 주파수60(Hz), 회전수 1500(rpm), 그리고 극수 4극의 3상 권선형 유도전동기이다. 이 전동기의 등가회로정수는 $R_1 = 12.5(\Omega)$, $R_2 = 3.9 \times n^2(\Omega)$, $X_1 = 8.8(\Omega)$, $X_2 = 8.8(\Omega)$, $X_m = 180(\Omega)$, 그리고 $n = 516/264$ 이다.

3가지 경우에 대한 해석을 위하여 먼저 불평형 선간전압 $V_{AB} = 201.6(V)$, $V_{BC} = 216.9(V)$, $V_{CA} = 208.0(V)$ 가 인가된 경우 즉, 정상분전압 $V_{1P} = 102.771 - j62.954(V)$ 과 역상분전압 $V_{1N} = -5.097 + j0.667(V)$ 로 전압 불평형을 $VUF = 4.3(\%)$ 일 때 실험하 실험한 결과와 등가회로에 의한 계산결과를 Table1에 보였다.

Table 1. Unbalanced current and input power at $VUF(\%) = 4.3$

a) Test results

Charact eristics Speed(rpm)	$I_A(A)$	$I_B(A)$	$I_C(A)$	$I_H(A)$	$I_N(A)$	CUF%	P(W)
1517	1.06	1.27	1.4	1.236	0.196	15.9	363
1493	1.11	1.32	1.45	1.286	0.196	15.3	378
1470	1.16	1.36	1.5	1.333	0.196	14.7	392
1443	1.22	1.41	1.55	1.387	0.191	13.7	417
1414	1.26	1.46	1.6	1.433	0.196	13.7	434

b) Computed results

Charact eristics Speed(rpm)	$I_A(A)$	$I_B(A)$	$I_C(A)$	$I_H(A)$	$I_N(A)$	CUF%	P(W)
1517	1.064	1.314	1.369	1.251	0.194	15.5	363.759
1493	1.134	1.367	1.463	1.321	0.194	14.7	410.209
1470	1.201	1.466	1.527	1.388	0.194	14	434.672
1443	1.278	1.536	1.603	1.466	0.193	13.2	462.977
1414	1.36	1.619	1.683	1.548	0.193	12.5	492.159

이들 결과에서 보듯이 부하가 증가함에 따라 전류 불평형율(CUF)은 작아지지만 불평형 전류의 최대치는 커지고 정상분 전류도 커지지만 역상분 전류는 일정하게 유지되고 있다. 입력전력도 부하 증가에 따라 증가함을 보이고 있다.

또한 정격회전수 부근의 시험치와 계산치가 잘 일치하고 있으므로 시험전동기의 등가회로 정수로 다양

한 전압 불평형 상태에 대한 정격회전수 부근의 해석이 가능하다.

Table 2는 전동기의 정격회전수에서 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우로 전압 불평형율이 4(%)와 6(%)일때의 해석결과이다.

이 표에서 8가지 기호는 각각

- 3 ϕ -UV : 3상 부족전압
- 2 ϕ -UV : 2상 부족전압
- 1 ϕ -UV : 1상 부족전압
- 2 ϕ -A : 2상 각변위
- 1 ϕ -A : 1상 각변위
- 1 ϕ -OV : 1상 과전압
- 2 ϕ -OV : 2상 과전압
- 3 ϕ -OV : 3상 과전압

의 경우를 의미한다.

Table 2에서 전압 불평형율이 2(%)변화할 때 전류 불평형율은 7(%)변화하고 있으므로 작은 전압변화에 대하여 전류의 변화가 크다. 부족전압 불평형의 경우는 1상불평형일 때 최대전류와 최대전력이 되고 과전압 불평형의 경우는 3상 불평형일 때 최대전류와 최대전력이 된다. 각변위를 갖는 경우는 2상 각변위의 경우가 1상 각변위의 경우보다 전류와 전력이 큰 값이 된다.

한편,

$$CUF = \frac{|I_{1N}|}{|I_{1P}|} = \frac{|V_{1N}| / |Z_N|}{|V_{1P}| / |Z_P|} = \frac{|Z_P|}{|Z_N|} VUF \quad (13)$$

의 관계가 있으므로 회전수(슬립)가 일정하면 $|Z_P|$ 와 $|Z_N|$ 도 일정하므로 전류 불평형율은 전압 불평형율에 비례하고 여러 가지의 불평형 전압과는 무관하다.

Table 3는 전동기의 정격회전수에서 1상만 불평형 전압이고 다른 전압 불평형율을 갖는 해석 결과이다. Table 3에서 1상이 전압이 작아질수록 전압 불평형율은 커지고 이에 따라 전류 불평형율도 비례하여 커지고 있으나 최대전류는 증가하고 입력전력은 감소하고 있다.

Table 4는 전동기의 정격회전수에서 정상분 전압은 같고 역상분 전압만 경우의 해석결과이다.

Table 2. Comparison of unbalanced currents and input powers of 8 different unbalanced voltages under rated speed

	VUF (%)	V _a	V _b	V _c	V ₁	V ₂	I _a	I _b	I _c	I ₁	I ₂	CUF (%)	PI
Balanced	0	120∠0°	120∠240°	120∠120°	120	0	1.295	1.295	1.295	1.295	0	0	396.908
3φ-UV	4	103.937∠0°	106.488∠240°	118.110∠120°	109.512	4.362	1.062	1.163	1.338	1.182	0.165	13.9	332.177
2φ-UV	4	106.638∠0°	108∠240°	120∠120°	111.213	4.446	1.080	1.179	1.360	1.200	0.168	14	342.589
1φ-UV	4	106.205∠0°	120∠240°	120∠120°	115.402	4.588	1.075	1.363	1.316	1.246	0.174	13.9	368.871
2φ-A	4	120∠0°	120∠131.9°	120∠116°	119.800	4.793	1.416	1.365	1.115	1.293	0.181	14	397.538
1φ-A	4	120∠0°	120∠240°	120∠113.1°	119.807	4.814	1.162	1.466	1.271	1.293	0.182	14.1	397.602
1φ-OV	4	135.024∠0°	120∠240°	120∠120°	125.008	5.008	1.536	1.297	1.296	1.349	0.189	14	432.859
2φ-OV	4	137.858∠0°	130.677∠240°	120∠120°	129.512	5.188	1.575	1.400	1.239	1.398	0.196	14	464.612
3φ-OV	4	140.031∠0°	132∠240°	121.890∠120°	131.307	5.248	1.600	1.410	1.262	1.417	0.198	14	477.570
3φ-UV	6	97.512∠0°	101.291∠240°	118.11∠120°	105.638	6.331	0.971	1.122	1.367	1.140	0.238	20.9	310.972
2φ-UV	6	99.213∠0°	102.614∠240°	120∠120°	107.276	6.437	0.989	1.153	1.380	1.158	0.243	21	320.721
1φ-UV	6	99.591∠0°	120∠240°	120∠120°	113.197	6.803	0.970	1.400	1.333	1.222	0.257	21	357.114
2φ-A	6	120∠0°	120∠227.7°	120∠113.9°	119.540	7.192	1.479	1.406	1.024	1.290	0.272	21	398.267
1φ-A	6	120∠0°	120∠240°	120∠109.7°	119.569	7.181	1.102	1.550	1.265	1.290	0.271	21	398.445
1φ-OV	6	142.961∠0°	120∠240°	120∠120°	127.654	7.654	1.663	1.214	1.306	1.378	0.289	21	454.134
2φ-OV	6	147.874∠0°	136.724∠240°	120∠120°	134.866	8.100	1.734	1.471	1.211	1.456	0.306	21	506.916
3φ-OV	6	150.236∠0°	137.953∠240°	121.89∠120°	136.683	8.207	1.762	1.479	1.236	1.475	0.310	21	520.739

Table 3. Comparison of unbalanced currents and Input powers of different VUF cases under rated speed

VUF (%)	V _a	V _b	V _c	V ₁	V ₂	I _a	I _b	I _c	CUF (%)	PI
0	120∠0°	120∠240°	120∠120°	120	0	1.295	1.295	1.295	0	396.908
1	116.409∠0°	120∠240°	120∠120°	118.803	1.197	1.238	1.312	1.282	3.5	389.151
2	112.913∠0°	120∠240°	120∠120°	117.638	2.362	1.182	1.328	1.270	7.0	381.911
3	109.512∠0°	120∠240°	120∠120°	116.504	3.496	1.128	1.346	1.257	10.5	375.157
4	106.205∠0°	120∠240°	120∠120°	115.402	4.598	1.021	1.380	1.233	17.5	362.286
5	102.898∠0°	120∠240°	120∠120°	114.209	5.701	1.021	1.380	1.223	17.5	362.286
6	99.591∠0°	120∠240°	120∠120°	113.197	6.803	0.988	1.386	1.222	19.5	356.563
7	96.472∠0°	120∠240°	120∠120°	112.157	7.843	0.920	1.418	1.210	24.5	351.949

Table 4. comparison of unbalanced currents and input powers of same positive sequence voltage but different negative sequence voltages under rated speed

VUF (%)	V _a	V _b	V _c	V ₁	V ₂	I _a	I _b	I _c	I ₁	I ₂	CUF (%)	PI
0	120∠0°	120∠240°	120∠120°	120	0	1.295	1.295	1.295	1.295	0	0	396.908
1	122.079∠0°	120∠240°	117.921∠120°	120	1.200	1.338	1.288	1.261	1.295	0.045	3.5	497.030
2	124.157∠0°	120∠240°	115.843∠120°	120	2.400	1.380	1.283	1.227	1.295	0.091	7.0	397.397
3	126.236∠0°	120∠240°	113.764∠120°	120	3.600	1.423	1.279	1.194	1.295	0.136	10.5	398.009
4	128.315∠0°	120∠240°	111.685∠120°	120	4.801	1.467	1.277	1.162	1.295	0.181	14.0	398.867
5	130.394∠0°	120∠240°	109.606∠120°	120	6.001	1.510	1.277	1.130	1.295	0.277	17.5	399.968
6	132.472∠0°	120∠240°	107.528∠120°	120	7.201	1.553	1.278	1.100	1.295	0.272	21.0	401.315
7	134.551∠0°	120∠240°	105.449∠120°	120	8.401	1.596	1.280	1.071	1.295	0.317	24.5	402.906

Table 4에서 보는 바와 같이 전압 불평형율이 커질 수록 최대전류와 입력전력이 증가하고 있다. 또한 정상분 전압을 정격전압과 같게 하고 전압 불평형율을

증가시키면 역상분 전압과 전류 불평형율도 비례하여 증가한다. 이 경우는 3상 상전류사이의 차가 가장 크게 나타나고 있다.

IV. 결론

불평형 전압 인가시의 3상유도전동기의 불평형 전류와 입력전력을 분석하였다. 분석을 위하여 특정한 불평형 전압이 인가될 때 전동기의 부하실험을 하고 실험 결과치와 T형 등가회로에 의한 계산치를 비교하여 등가회로에 의한 해석이 타당성을 입증하였다.

다양한 불평형 전압 패턴 즉, (1) 전압 불평형은 같지만 다른 불평형 전압의 경우, (2) 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형율이 다른 경우, (3) 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우에 대하여 분석하였다.

각 경우에 대한 분석결과 (1) 부족전압 불평형의 경우는 1상 불평형일 때 최대전류와 최대전력이 되고, 과전압 불평형의 경우는 3상 불평형일 때 최대전류와 최대전력이 된다. 각변위를 갖는 경우는 2상 각변위의 경우가 1상 각변위의 경우보다 최대전류는 크고 전력은 비슷하게 된다. (2) 1상의 전압이 작아질수록 전압 불평형율은 커지고 이에 따라 전류 불평형율도 커지고 있으나 최대전류는 증가하고 입력전력은 감소한다. (3) 전압 불평형율이 커지면 역상분 전압과 전류 불평형율도 비례하여 증가하고 이 경우가 3상 상전류사이의 차가 가장 크다.

on AC Motor Characteristics".IEEE Trans. on IA. Vol.IA-8. No.4. pp.383-400. 1972.

- [2] J.E.Williams. "Operation of Three-Phase Induction Motors on Unbalanced Voltages". AIEE Trans. Vol.73. pp.125-133. Apr., 1954.
- [3] N.R.Rao and P.A.D.J.Rao. "Rerating Factors of Polyphase Induction Motors Under Unbalanced LineVoltage Conditions". IEEE Trans. on. Vol.PAS-87. No.1. pp.240-249. 1968.
- [4] R.F.Woll. "Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors".IEEE Trans. on IA. Vol.IA-11. No.1. pp.38-42. 1975.
- [5] C.Y.Lee. "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. 1999.
- [6] P.Pillay and M.Manyage. "Definitions of Voltage Unbalance". IEEE Power Engineering Review. pp.50-51. May. 2001.
- [7] Y.J.Wang. "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. 2001.

참고문헌

- [1] J.R.Linders. "Effects of Powe Supply Variations