

불평형 전압이 인가된 유도전동기 동손의 예측

김도진* · 좌종근**

Method of Predicting Copper Loss on Induction Motor Applied by Unbalance Voltage

Do-Jin Kim* · Chong-Keun Jwa**

ABSTRACT

This paper describes the method of predicting copper loss of an induction motor which is operated by unbalanced voltage, with minimum operation data. The unbalanced current and speed of motor are needed for these data. The current unbalance factor(CUF), symmetrical components of current, and CUF angle are computed by using the definition of symmetrical coordinate method. The equivalent circuit parameters under operating condition are determined using the ratio of symmetrical component of voltage and current, and symmetrical impedances. The copper loss is reasonably predicted by these parameters.

Key Words: Unbalanced voltage, Induction motor, Current unbalanced factor, Copper loss

I. 서 론

전압 불평형은 3상 유도전동기에 과열, 선전류의 불평형, 정격의 감소, 토크의 맥동, 그리고 효율의 불량 등 해로운 영향을 준다. 3상 유도전동기에 대한 전압 불평형 영향의 연구는 전동기의 설계, 보호, 운전, 유지, 그리고 수명평가가 전

동기가 대상이 되는 전압 불평형의 정도에 밀접한 관계가 있기 때문에 활발하게 되고 있다[1].

이에 따라 Williams[2]는 기준전압에 대한 함이나 차로 대표되는 2개의 불평형 계수를 사용하여 다양한 전압패턴에 따른 전류와 손실을 T형 등가 회로에 의하여 양적인 평가를 하고 있다. Rao 와 Rao[3]는 재정격 계수(rerating factor)를 정의하고 전동기에서 가열의 불평형 공간분포의 정도는 전압 불평형률보다 전류 불평형률이 더 좋게 표현될 수 있음을 보이고 있다. Linders[4]는 유도전동기의 불평형 전압 운전시 불평형의 원인과 영향을 분석하고 있다. Wolf[5]는 유도전동기에 불

* 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.

평형 전압이 인가될 때 속도-토포크 특성은 물론 손실과 온도상승에 대하여 검토하고 있다. Lee[6]는 실부하 실험으로 다양한 불평형 전압 패턴하에서의 효율, 역률, 손실, 그리고 온도상승 등을 분석하고 있다.

그러나 이들의 연구에서는 주로 불평형 전압인 가시의 제특성의 해석과 분석이 되고 있으나 특성의 추정이나 예측에 대한 연구는 되어 있지 않다. 또한, 전동기의 운전시 동손은 온도상승과 수명에도 직접적인 영향을 미치므로 이에 대한 정확한 예측이 필요하다.

본 논문에서는 유도전동기의 불평형 전압 운전시의 측정된 불평형 전류의 크기와 속도를 이용하여 운전시의 등가회로 정수를 결정하고 이로부터 동손을 예측하고자 한다.

II. 해석 이론

1. 복소 전압 불평형률과 복소 전류 불평형률

일반적으로 사용하고 있는 전압불평형은 IEC (International Electrotechnical Commission)의 정상분 전압에 대한 역상분 전압의 비로 정의한 것을 사용하고 있다. 그러나 정상분 전압과 역상분 전압의 각각의 위상이나 이들 사이의 위상차에 따른 해석이 필요한 경우에는 정상분 전압 페이저에 대한 역상분 전압 페이저의 비로 정의되는 복소전압 불평형률을 사용할 수 있다[1].

3상의 상전압을 각각 V_a , V_b , 그리고 V_c 라면 이들의 대칭좌표법에 의한 영상분 V_0 , 정상분 V_1 , 그리고 역상분 V_2 는 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $a = \exp(j\frac{2\pi}{3})$ 이다.

IEC에 의한 전압 불평형률은 (VUF)은

$$VUF = \frac{|V_2|}{|V_1|} \times 100 \quad (2)$$

이고, 복소 전압 불평형률 ($CVUF$) k_v 는 다음과 같이 정의한다.

$$k_v = \frac{V_2}{V_1} = |k_v| \exp(j\theta_v) \quad (3)$$

여기서 $|k_v|$ 는 역상분 전압과 정상분 전압의 크기의 비이고, θ_v 는 이들의 위상차이다.

3상의 선간전압에 대해서도 같은 방법으로 정의하여 복소 전압 불평형률을 k_u 라고 하면 k_u 와의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} k_u &= |k_u| \exp(j\theta_u) \\ &= k_v \exp(-j\frac{\pi}{3}) \\ &= |k_u| \exp[j(\theta_v - \frac{\pi}{3})] \end{aligned} \quad (4)$$

3상 유도전동기 각상의 전류를 I_a , I_b , 그리고 I_c 라 하고 이들의 대칭성분을 각각 I_0 , I_1 , I_2 라 한다. 그러나 3상 유도 전동기에서는 중성점을 이용하지 않으므로 영상분 전류는 흐를 수 없다. 그러므로 각 상전류와 대칭분 전류 사이의 관계는 다음과 같다.

$$I_a = I_1 + I_2 \quad (5)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 \quad (6)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 \quad (7)$$

또한 전류 불평형률(CUF)도 전압 불평형률과 유사하게

$$CUF = \frac{|I_2|}{|I_1|} \times 100 \quad (8)$$

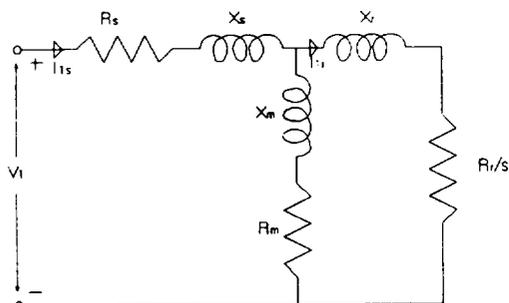
으로 정의할 수 있고, 복소 전류 불평형률(CCUF)도

$$k_c = \frac{I_2}{I_1} = |k_c| \exp(j\theta_c) \quad (9)$$

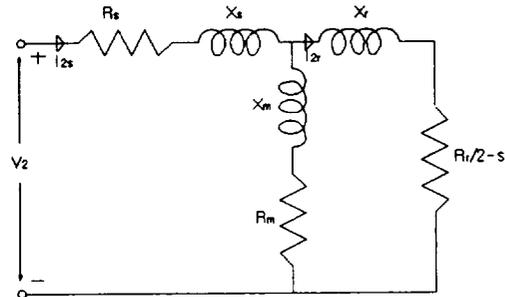
와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $|k_c|$ 는 역상분 전류와 정상분 전류의 크기의 비이고, θ_c 는 이들의 위상차이다.

2. 동손의 예측

불평형 전압으로 운전하고 있는 3상 유도전동기의 대칭과표법에 의한 상당 등가회로는 Fig. 1과 같다. 등가회로에서 R_s 와 X_s 는 고정자의 저항과 누설리액턴스를, R_r 과 X_r 은 고정자 측으로 환산한 회전자 저항과 누설리액턴스를, R_m 은 철손과 기계손을 대표하는 저항을, 그리고 X_m 과 s 는 자화리액턴스와 슬립을 의미한다.



a) Positive sequence circuit



b) Negative sequence circuit

Fig. 1. Equivalent circuit of induction motor under the unbalanced voltage operation.

이 회로에서 정상분과 역상분 임피던스를 각각 Z_1 과 Z_2 라 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_s + jX_s + (R_m + jX_m) // \left(\frac{R_r}{S} + jX_r \right) \\ &= R_e(Z_1) + jI_m(Z_1) \\ &= \frac{V_1}{I_{1s}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Z_2 &= R_s + jX_s + (R_m + jX_m) // \left(\frac{R_r}{2-S} + jX_r \right) \\ &= R_e(Z_2) + jI_m(Z_2) \\ &= \frac{V_2}{I_{2s}} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 R_e 와 I_m 은 각각 실수부와 허수부를 표시한다.

유도전동기에 인가된 불평형 전압과 전동기의 회전수가 알려지고 3상 불평형 전류의 크기가 측정되어 알려졌을 때 동손의 예측방법을 제시한다.

먼저 측정된 $|I_a|$, $|I_b|$, 그리고 $|I_c|$ 를 식(9)와 식(5), (6), (7)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I_a = I_{1s} + |k_c| I_{1s} \exp(j\theta_c) \quad (12)$$

$$I_b = a^2 I_{1s} + a |k_c| I_{1s} \exp(j\theta_c) \quad (13)$$

$$I_c = a I_{1s} + a^2 |k_c| I_{1s} \exp(j\theta_c) \quad (14)$$

이 식들 크기만으로 정리하면

$$\begin{aligned} |I_a|^2 &= |I_{1s}|^2 (1 + |k_c|^2 + 2|k_c| \cos \theta_c) \\ &= |I_{1s}|^2 + |I_{2s}|^2 + 2|I_{1s}||I_{2s}| \cos \theta_c \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} |I_b|^2 &= |I_{1s}|^2 (1 + |k_c|^2 - |k_c| \cos \theta_c \\ &\quad + \sqrt{3}|k_c| \sin \theta_c) \\ &= |I_{1s}|^2 + |I_{2s}|^2 - |I_{1s}||I_{2s}| \cos \theta_c \\ &\quad + \sqrt{3}|I_{1s}||I_{2s}| \sin \theta_c \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} |I_c|^2 &= |I_{1s}|^2 (1 + |k_c|^2 - |k_c| \cos \theta_c \\ &\quad - \sqrt{3}|k_c| \sin \theta_c) \\ &= |I_{1s}|^2 + |I_{2s}|^2 - |I_{1s}||I_{2s}| \cos \theta_c \\ &\quad - \sqrt{3}|I_{1s}||I_{2s}| \sin \theta_c \end{aligned} \quad (17)$$

이 되고, 이 식들은 $|I_{1s}|$, $|k_c|$, θ_c 또는 $|I_{1s}|$, $|I_{2s}|$, θ_c 를 미지수로 하는 비선형 연립방정식이므로 이 값들을 구할 수 있다.

다음으로 여기서 구해진 I_{1s} , I_{2s} 와 주어진 불평형 전압과 슬립으로 식(10)과 식(11)을 사용하여 다음식을 구성한다.

$$\left| \operatorname{Re} \left(\frac{V_1}{I_{1s}} \right) \right| = \operatorname{Re}(Z_1) \quad (18)$$

$$\left| \operatorname{Re} \left(\frac{V_2}{I_{2s}} \right) \right| = \operatorname{Re}(Z_2) \quad (19)$$

$$\left| I_m \left(\frac{V_1}{I_{1s}} \right) \right| = I_m(Z_1) \quad (20)$$

$$\left| I_m \left(\frac{V_2}{I_{2s}} \right) \right| = I_m(Z_2) \quad (21)$$

이 식들은 R_s , X_s , R_r , R_m , 그리고 X_m 을 미지수로 하는 비선형 연립방정식이 된다. 그러나 Table 1[7]에서 보듯이 권선형이나 농형의 Design A, D에서는 $X_s = X_r$ 로 되어 있고 대부분의 전동기가 이와 같은 형의 것이므로 이 조건을 이용하여 해를 구한다.

Table 1. Evaluating X_s and X_r from blocked-rotor reactance at rated frequency

Rotor	X_s and X_r as fractions of X_{BR}
Wound	$X_s = X_r = 0.5X_{BR}$
Design A	$X_s = X_r = 0.5X_{BR}$
Design B	$X_s = 0.4X_{BR}$, $X_r = 0.6X_{BR}$
Design C	$X_s = X_r = 0.3X_{BR}$, $X_r = 0.7X_{BR}$
Design D	$X_s = X_r = 0.5X_{BR}$

유도전동기의 등가회로 정수가 구해지면 불평형 운전시의 모든 특성을 구할 수 있다. 이 특성 가운데 동손은 다음 식으로 계산 된다.

$$P_c = R_s (|I_{1s}|^2 + |I_{2s}|^2) + R_r (|I_{1r}|^2 + |I_{2r}|^2) \quad (22)$$

III. 해석결과 및 분석

해석이론에 의하여 불평형 전압이 인가되어 운전되고 있는 3상 유도전동기의 불평형 3상 전류의 크기와 회전수가 측정되었을 때 동손을 예측하기 위하여 손실이 많은 소형전동기를 선택하였다.

분석에 사용한 전동기는 정격전압 208[V], 전류 1.3[A], 출력 175[W], 주파수 60[Hz], 회전수

1500[rpm], 그리고 극수 4극의 3상 권선형 유도 전동기 이다.

이 전동기에 전기동력계를 부하로하여 불평형 선간전압 $V_{ab}=201.6[V]$, $V_{bc}=216.9[V]$, $V_{ca}=208.0[V]$ 가 인가된 경우 즉, 정상분 전압 $V_1=102.771-j62.954[V]$ 과 역상분 전압 $V_2=-5.097+j0.667[V]$ 로 전압 불평형을 $VUF=4.3[\%]$ 일 때 시험하여 측정된 입력과 전류, 그리고 측정전류로부터 식(15), (16), (17)을 사용하여 계산한 대칭분 전류와 식(8)에 의한 전류 불평형률을 Table 2에 보였다.

Table 2. Measured input power and unbalanced current at $VUF(\%)=4.3$

Power & current Speed[rpm]	P_{in}	$I_a[A]$	$I_b[A]$	$I_c[A]$	$I_1[A]$	$I_2[A]$	CUF[%]
1517	353	1.06	1.27	1.40	1.236	0.196	15.9
1493	378	1.11	1.32	1.45	1.286	0.196	14.7
1470	392	1.16	1.36	1.50	1.333	0.196	14.7
1443	417	1.22	1.41	1.55	1.387	0.191	13.7
1414	434	1.26	1.46	1.60	1.433	0.196	13.7

이 결과와 식(15), (16), (17)에서 구한 θ_c 를 사용하여 식(18)~(21)에 의하여 계산한 등가회로 정수와 제작회사에서 제공한 정수를 Table 3에 보였다.

Table 3. Manufacturer's and computed equivalent circuit parameters tested moter

Parameters	$R_s[\Omega]$	$R_r[\Omega]$	$X_s[\Omega]$	$X_r[\Omega]$	$R_m[\Omega]$	$X_m[\Omega]$	Remarks
Manufacturer's	12.5	$3.9 \times n^2$	8.8	8.8	none	180	$n=516/264$
Computed	14.569	15.439	6.776	6.776	5.023	168.913	1517[rpm]
	14.272	16.030	6.696	5.009	162.570	162.570	1493[rpm]
	13.556	16.402	7.421	7.421	4.990	160.847	1470[rpm]
	13.741	16.729	8.041	8.041	4.979	155.202	1443[rpm]
	12.843	17.712	7.257	7.257	4.950	151.263	1414[rpm]

Table 3의 제작회사에서 제공한 정수를 사용하여 계산한 입력과 전류를 Table 4에 보였다.

Table 4. Computed input power and current by manufacturer's circuit parameters (at VUF(%)=4.3)

Power & current Speed[rpm]	P_{in}	$I_a[A]$	$I_b[A]$	$I_c[A]$	$I_1[A]$	$I_2[A]$	CUF[%]
1517	383.767	1.251	1.314	1.395	1.251	0.194	15.5
1493	410.218	1.134	1.387	1.463	1.321	0.194	14.7
1470	434.882	1.201	1.456	1.527	1.388	0.194	14.0
1443	462.989	1.278	1.535	1.603	1.466	0.193	13.2
1414	492.171	1.360	1.619	1.683	1.548	0.193	12.5

또한, Table 3의 운전상태에서 계산한 정수를 사용하여 계산한 입력과 전류를 Table 5에 보였다.

Table 5. Computed input power and current by computed circuit parameters (at VUF(%)=4.3)

Power & current Speed[rpm]	P_{in}	$I_a[A]$	$I_b[A]$	$I_c[A]$	$I_1[A]$	$I_2[A]$	CUF[%]
1517	383.724	1.058	1.271	1.399	1.235	0.197	15.9
1493	399.190	1.108	1.319	1.449	1.285	0.197	15.3
1470	413.239	1.155	1.378	1.492	1.335	0.195	14.6
1443	429.271	1.216	1.436	1.540	1.391	0.188	13.5
1414	444.141	1.255	1.475	1.592	1.434	0.195	13.6

Table 2와 Table 4의 결과를 비교하기 위하여 측정치에 대한 계산치의 상대오차를 사용하면 입력은 부하가 증가함에 따라 8.716[%]에서 13.403[%]로 커지고 전류는 1517[rpm]에서 a상 전류(18.019[%])를 제외하고 부하전류 증가에 따라 -0.357[%]에서 10.890[%]까지의 범위로 커지고 있다.

Table 2와 Table 5의 결과를 비교하면 입력은

부하가 증가에 따라 8.704[%]에서 2.337[%]로 작아지고 전류는 부하변화에 특별한 규칙성이 없이 -0.071[%]에서 1.844[%]까지의 범위로 2[%]이내에 있다.

이상의 결과에서 보듯이 본논문에서 제안한 방법이 실측치와의 오차가 작아 동손의 예측에 적합함을 알 수 있다.

이 방법에 의하여 각 부하상태의 동손을 예측하면 Table 6과 같으며 부하증가에 따라 동손이 커지고 있음을 알 수 있다.

Table 6. Predicted copper loss at VUF[%]=4.3

Speed [rpm]	1517	1493	1470	1443	1414
Copper loss[w]	118.613	128.653	136.650	150.509	158.889

따라서 이 방법은 산업현장에서 전동기 불평형 전압 운전시 비교적 적은 정보 즉, 불평형 전압, 불평형 전류의 크기, 그리고 회전수로 전동기의 제 특성을 비교적 정도 높게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

불평형 전압으로 운전되고 있는 유도전동기의 최소의 자료를 이용한 동손의 예측방법을 제시하였다. 최소의 자료로 전동기의 불평형 전류의 크기와 속도가 필요하다. 불평형 전류의 크기로 전류 불평형률, 대칭분 전류, 그리고 역상분 전류와 정상분 전류의 위상차를 대칭좌표법의 정의식과 복소 전류 불평형률을 사용하여 연립방정식을 구성하여 계산하였다. 각 대칭분 전압과 전류의 비의 크기와 대칭분 임피던스의 크기로 연립방정식을 구성하여 운전시 등가회로의 정수를 결정하였다. 이 정수를 사용하여 계산한 입력과 전류를 제작회사의 정수를 사용하여 계산한 값들과 비교하여 제안한 방법이 정도가 높음을 확인하여 동손을 예측하였다.

참고문헌

- [1] Y.J. Wang, 2001, Analysis of Effects of Three-phase Voltage Unbalance on Induction Motor with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor, IEEE Trans. on EC, Vol. 16, No. 3, pp. 270-275.
- [2] J.E. Williams, 1954, Operation of Three phase Induction Motor on Unbalanced Voltage, AIEE Trans., Vol. 73, pp. 125-133.
- [3] N.R. Rao and P.A.D.J. Rao, 1968, Rerating Factors of Polyphase Induction Motors under Unbalanced Line Voltage Conditions, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-87, No. 1, pp. 240-249.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] G. Mcpherson and R.D. Laramore, 1981, Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons.