

# 磁氣飽和를 考慮한 三相誘導電動機의 特性解析

左 宗 根

An Analysis of the Characteristics of three  
Phase Induction Motor, Considering Magnetic Saturation

Jwa, Chong Keun

## Summary

The usual procedure in considering the operation of induction motors has been to neglect the effect of magnetic saturation and harmonics. In this paper, the T-type equivalent circuit of three phase induction motor under the unbalanced nonsinusoidal voltage is studied. By this equivalent circuit, which is considered magnetic saturation, we are able to calculate the accurate characteristics of induction motors when the unbalanced nonsinusoidal voltages are supplied. From the equivalent circuit, the calculated values and the measured values are compared and it is found that the theory agree with the experiment within the accuracy of 7%.

## I. 序 論

小形, 輕量化된 E種絶緣電動機의 使用範圍가 拡大되어, 磁氣飽和가 隨特性에 미치는 影響이 점점 問題가 되고, 또 實際電動機에 印加되는 三相電壓의 波形은 不平衡 非正弦波가 大部分이므로 이들을 考慮하여 特性을 檢討할 必要가 있다.

不平衡 非正弦波電壓이 印加된 경우의 三相誘導電動機의 特性에 대해서는 이미 發表(吳 1969, 左 1975)되었으나, 前者에서는 1,2次漏洩리액턴스를 分離한 T型 等價回路(JEC-37)를 使用하였고, 後者에서는 1,2次漏洩리액턴스를 分離할 必要가 없는 新T型 等價回路(Ishizaki等 1967)를 使用하여 特性을 解析하였으나 어느 것이나 磁氣飽和에 의한 回路定數의 變化를 無視하였기 때문에 精密한 特性計算을 要求하는 경우에는 未洽하다.

따라서 筆者는 Miki(1978) 등이 提案한 磁氣飽和를 考慮한 誘導電動機 定數 決定方法에 따라 T型 等

價回路를 使用하여 不平衡 非正弦波에 대한 三相誘導電動機의 特性을 考察하였다.

그러나, 特性計算時 鐵損은 基本波電壓 印加에만 考慮하였고 抵抗의 周波數에 의한 變化 등은 考慮하지 않았다.

## II. 等價回路 및 特性式

### 1) T型 等價回路와 飽和의 影響

特性算定에 使用되는 誘導機의 等價回路로서는 T型, 新T型 및  $\pi$ 型 等價回路가 있으나 이 중 新T型 等價回路는 磁氣飽和를 考慮한 경우 2次抵抗과 2次漏洩리액턴스가 主磁路와 漏洩磁路의 飽和의 影響을 받아 變化하고 그 動向을 嚴密하게 把握하는 것이 困難하기 때문에 適切하다고 할 수 없다. 그러므로 여기서는 定數算定計算의 節次 등을 考慮하여 그림 1에 보인 T型 等價回路를 使用하였다.

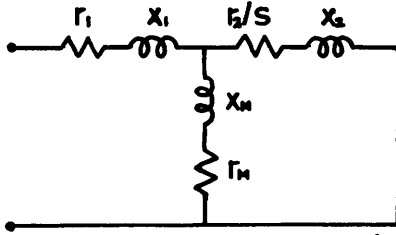


Fig. 1. T type equivalent circuit of induction motor

等価回路에서 勵磁리액턴스  $x_m$ 의 變化는 勵磁임피던스 사이의 電壓에 의하여 影響을 받으므로 主磁路 飽和의 影響은 勵磁임피던스 사이의 電壓에 대한  $x_m$ 의 變化로서 表示된다. 漏洩磁路의 飽和는 回轉子 슬롯의 形狀에 따라 다르므로 1, 2次漏洩리액턴스  $x_1, x_2$ 도 半閉슬롯 回轉子機에서는 定格電流의 200 [%] 以上の 電流에서, 全閉슬롯 回轉子機에서는 定格電流 以上の 電流에서 漏洩磁路의 飽和에 의한 變化가 크므로 각각 1次 및 2次電流의 函數로서 表示된다.

2)  $h$ 次 高調波電壓에 對한 等価回路의 特性式

解析方法과 特性式의 誘導課程에 對해서는 文獻(左 1975)에 詳述되어 있고 다만 等価回路만 다르므로 重複을 피하기 위하여 檢討에 必要한 等価回路의 特性式만을 記載한다.

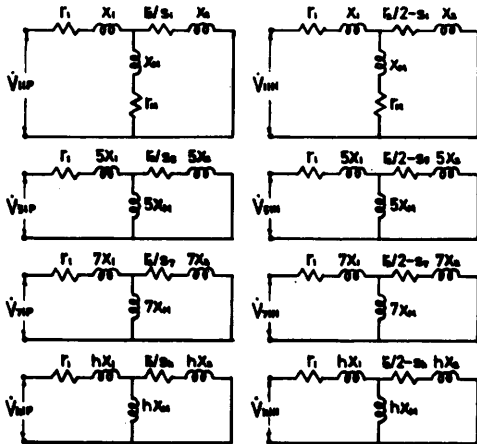


Fig. 2. Equivalent circuit of induction motor with unbalanced, nonsinusoidal excitation  
그림 2의 等価回路에서

$V$  : 1次相電壓

$r_1$  : 1次巻線 1相의 抵抗

$r_2$  : 2次巻線 1相의 抵抗(1次換算值)

$x_1$  : 1次巻線 1相의 基本波에 對한 漏洩리액턴스

$x_2$  : 2次巻線 1相의 基本波에 對한 漏洩리액턴스

(1次換算值)

$r_m$  : 鐵損分抵抗

$x_m$  : 基本波에 對한 勵磁리액턴스

$s$  : 슬립

$h$  : 高調波의 次數

이다.

이 等価回路로 부터 誘導한 諸特性式에서  $g, b$ 는 각각 콘덕턴스 및 서셉턴스이고 添字가 3個있는 記호에 있어서 第1添字  $h$ 는 高調波의 次數를 第2添字 1은 1次回路,  $M$ 은 勵磁回路,  $N$ 은 2次回路, 3은 勵磁回路와 2次回路의 合成을 表示하고, 第3添字  $p$ 는 正相分  $N$ 는 逆相分을 表示한다.

全 1次電流의 正相分 實効值는

$$I_{1p} = \sqrt{\sum |\dot{i}_{h1p}|^2} = \sqrt{\sum \frac{V_{h1p}^2}{(r_1 + r_{h3p})^2 + (x_{h1p} + x_{h3p})^2}} \quad (A)(1)$$

全 1次電流의 逆相分 實効值는

$$I_{1N} = \sqrt{\sum |\dot{i}_{h1N}|^2} = \sqrt{\sum \frac{V_{h1N}^2}{(r_1 + r_{h3N})^2 + (x_{h1N} + x_{h3N})^2}} \quad (A)(2)$$

또 全 2次電流의 正相分 實効值는

$$I_{2p} = \sqrt{\sum |\dot{i}_{h2p}|^2} = \sqrt{\sum \frac{I_{h1p}^2 (g_{h2p}^2 + b_{h2p}^2)}{(g_{hmp} + h_{2p})^2 + (b_{hmp} + b_{h2p})^2}} \quad (A)(3)$$

全 2次電流의 逆相分 實効值는

$$I_{2N} = \sqrt{\sum |\dot{i}_{h2N}|^2} = \sqrt{\sum \frac{I_{h1N}^2 (g_{h2N}^2 + b_{h2N}^2)}{(g_{hmn} + g_{h2N})^2 + (b_{hmn} + b_{h2N})^2}} \quad (A)(4)$$

全토크는 正相分 全토크와 逆相分 全토크와의 差이므로

$$T = T_p - T_N = 3 \sum \left\{ |\dot{i}_{h2p}|^2 \frac{r_2}{s_h} - |\dot{i}_{h2N}|^2 \frac{r_2}{2s_h} \right\} (\text{Syn} \cdot W) \quad (5)$$

이고 全人力은

$$P_i = P_{ip} + P_{iN} = 3 \sum \left\{ |\dot{i}_{h1p}|^2 (r_1 + r_{h3p}) + |\dot{i}_{h1N}|^2 (r_1 + r_{h3N}) \right\} (W) \quad (6)$$

또 全出力은

$$P_o = T(1 - s_h) - W_m \quad (W) \quad (7)$$

이다. 여기서  $W_m$ 은 機械損이다.

따라서 效率은

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100 \quad (\%)$$

로서 구한다.

III. 結果 및 考察

1) 特性式의 結果를 檢討하기 위하여 表 1 과 같은 定格의 供試電動機에 대해서 Miki(1978) 등의 方法으로 1次巻線抵抗測定, 定格周波數 無負荷試驗, 定格周波數 拘束試驗 및 15 Hz 拘束試驗 結果 表 1 과 같은 基本波에 대한 回路定數를 測定하였다. 다음에 電動機에 線間電壓  $V_{uv}=210 [v]$ ,  $V_{vw}=220 [v]$ ,  $V_{wu}=214 [v]$  의 不平衡 基本波 3相電壓을 3台의 Variac 으로 調整하여 供試電動機에 印加하고 渦流制動形 動力計로서 出力을 測定하였다.

Table 1. Specifications & circuit constants of tested motor

Specifications	Circuit constants
電壓 200 V	$r_1 = 0.62970$
周波數 60 Hz	$x_1 = 1.13836$
極數 4	$x_1 = 4.47090 (I_1) - 0.48285$
出力 2.2 KW	$r_2 = 0.46474$
回轉數 1775 rpm	$x_2 = 1.13836$
回轉子 半閉슬롯	$x_2 = 4.39415 (I_2) - 0.48220$
	$r = -0.00960 E_0 + 3.44609$
	$x = -0.08504 E_0 + 40.07504$

上記 表中  $x_1, x_2$  의 1,2次電流의 函數로 表示된 式은 電流가 定格의 200 [%] 超過時 適用하고  $E_0$ 는 勵磁回路사이의 電壓이다.

이때 不平衡 電壓 및 電流의 對稱分은 Woll(1975)의 計算法에 의해 分解하였고 그 값은 表 2 와 같다.

Table 2. Symetrical components of supply voltage

Symetrical components Voltage [V]	Positive Sequence Component [V]	Negative Sequence Component [V.]
$V_{uv}$ 210		
$V_{vw}$ 220	214.62699	5.82638
$V_{wu}$ 214		

2) 測定値와 計算値를 比較하면 그림 3,4,5 와 같고 그림에서 보는 바와 같이 測定値와 計算値가 거의 一致하고 있음을 알 수 있다. 즉 正相分電流는 測定值

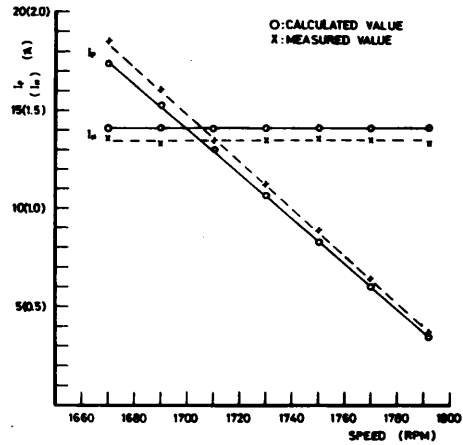


Fig.3. Positive (Negative) phase sequence current  $I_p (I_n)$  of primary vs. speed

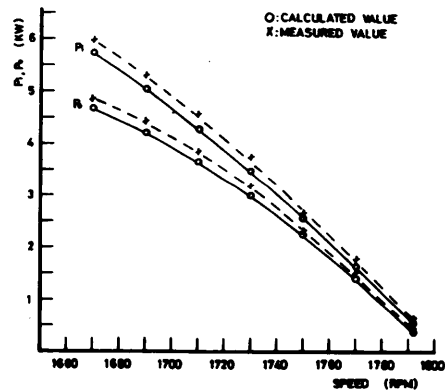


Fig.4. Input (Out put)  $P_i (P_o)$  vs. speed

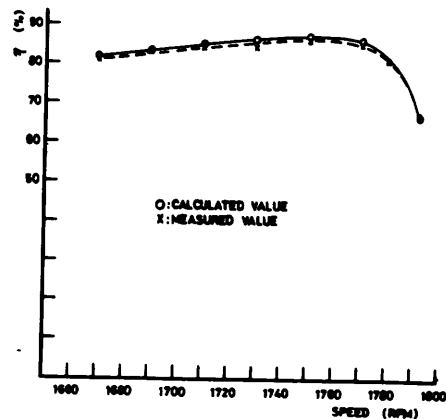


Fig.5. Efficiency vs. speed

에 대한 計算値의 誤差가  $-3.4 \sim -6.7$  [%], 逆相分電流는  $3.5 \sim 5.5$  [%], 入力은  $-2.9 \sim -14.5$  [%], 出力은  $-2.1 \sim -17.7$  [%], 效率은  $2.0 \sim -3.9$  [%] 이다.

基本波電壓만 印加하여 實驗한 것을 計算値와 比較하여 實驗値와 一致하는 것을 確認하였다. 따라서 等価回路의 特性式에서 보는 바와 같이 각 高調波電壓에 대한 것도 각각 獨立的으로 생각할 수 있으므로 特性의 比較檢討는 基本波電壓 印加時의 比較만으로도 充分하다.

#### IV. 摘 要

磁氣飽和를 考慮한 回路定數를 使用하여 不平衡 非正弦波電壓이 印加된 경우에 대한 三相誘導電動機 T型 等価回路의 特性式으로 부터 計算値를 구하고 實測値와 比較 檢討하였다.

그 結果 實測値에 대한 計算値의 誤差가 平均 7 [%] 以內로 精度가 높으므로 磁氣飽和를 考慮한 特性計算은 誘導電動機의 解析 및 特性把握 그리고 運轉에 도움이 될 것이다.

#### 引 用 文 獻

Ishizaki, A., Hirayama, K. 1967. Precise determination of equivalent circuit parameters for performance calculation of polyphase induction machines, IEEJ, 87(1), 173 ~ 180

左宗根. 1975. 精密等価回路에 의한 三相誘導電動機의 特性解析, 成大大学院 碩士學位論文

Miki, I., Matsuse, K., Nozawa, J., Takagi, K. 1978. A determining method of equivalent circuit constants of induction

motor, considering magnetic saturation, IEEJ-B, 98(6), 17 ~ 24

吳兢烈. 1969. 同一하지 않은 歪形派電壓이 3相誘導電動機의 特性에 미치는 影響, 大韓電氣學會誌, 18(4), 16 ~ 21.

Woll, R.F. 1975. Effect of unbalanced voltage on the operation of polyphase induction motors, IEEE Trans. Industry applications, IA-11(1), 38 ~ 42