

3 相籠型誘導電動機의 不平衡運轉에 대한 保護 方案

論 文
33~8~1

The Protection Method against the Operation under Unbalance Voltage in 3-phase Squirrel-Cage Induction Motor

李 殷 雄* · 朴 允 鎬**
(Un-Ung Lee · Youn-Ho Park)

Abstract

A new method of protecting 3-phase squirrel-cage induction motor against burning-out by unbalance operation is proposed. This paper studied various kinds of situations occurred by unbalance operating in 3-phase induction motor, and we provided the search coils in the slots of stator and rotor for the purpose of detecting electrical phenomena during unbalance operation.

Through experiments, we find that search coils in the slots of stator is effective method for protecting the induction motor from unbalance operating.

1. 序 論

3 相籠型誘導電動機는 特性이 우수하고 構造가 견고하여 産業界에서는 주된 動力源으로 이용되고 있다. 최근의 통계에 의하면 總發電電力의 60%를 電動機가 소비하며 電動機 전체의 80% 정도가 誘導電動機인 것으로 통계되어 있다.¹⁾ 이들중 대부분은 15kw 이하의 소형으로 빈번한 起動과 停止의 조작을 하거나 過負荷運轉²⁾ 혹은 印加電壓 不平衡狀態의 運轉³⁾을 계속하므로써 電動機에 무리가 가해지고 결국 捲線을 燒損시키게 된다. 電動機의 捲線이 燒損되면 全捲線을 모두 수리해야 하며 수리에 소요되는 비용과 인력, 그리고 생산공정에 미치는 영향이 클뿐만 아니라 재생된 電動機는 性能이 저하되는 경향이 있다.

電動機 捲線이 燒損되기 전 최종의 과정에서는 거의 대부분 缺相 등으로 不平衡運轉狀態를 수반하므로, ^{4), 5)} 현재 외국에서는 수종의 缺相결출리레이가 개발되어 이용되고 있다.

1960년대 후반부터 쓰여온 回轉型 缺相檢出리레이는 반대방향으로 토오크를 발생하는 두개의 웨이딩 코일형 固定子 가운데에 알루미늄 원반이 회전하도록 되어있다. 두상의 電流를 固定子코일에 흘려주며

可動接點이 固定接點에 接續되므로써 缺相을 檢出하는 構造로 두相만을 이용하므로 나머지 한상의 缺相은 檢出이 불가능하며 이를 보완하려면 2개의 電磁開閉器로 된 缺相리레이를 사용하여야 하므로 너무 비싸게 된다.

또, 최근에 개발된 半導體型 모터리레이는 각 相의 電壓과 電流를 동시에 검출하여 過電流, 不平衡, 缺相 및 逆相까지도 보호할 수 있는 기능을 갖고 있다.

그러나, 이러한 保護리레이들은 아직도 많은 缺點이 있어 대량보급과 實用化에는 문제점이 많다.

본 논문에서는 3 相籠型誘導電動機가 不平衡으로 運轉되는 경우의 여러가지 特性을 규명하고, 實驗用 電動機를 제작 實驗하므로써 더욱 견고하고 어떠한 不平衡運轉의 경우에서도 性能이 우수한 리레이를 開發하기 위한 資料를 얻고자 한다.

2. 故障發生 原因分析

3 相籠型誘導電動機의 故障發生 原因을 分析하면 다음과 같다.

- 1) 過負荷運轉, 入力電壓 低下 등으로 捲線의 流入電流가 증가하여 過熱되고 絶緣耐力 약화.
- 2) 捲線 内部의 層間短絡이나 絶緣破壞에 의한 不平衡運轉.

* 正 會 員: 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

** 正 會 員: 鴻源기계공업(주)

接受日字: 1982年12月27日

3) 入力電壓의 不平衡으로 인하여 야기되는 대단히 큰 電流의 不平衡.³⁾

4) 起動과 停止를 비번히 반복하므로써 熱的 疲勞가 누적, 回轉子導體가 短絡環으로부터 切斷되므로써 不平衡 磁氣吸引力 發生³⁾

5) 베어링의 過熱로 윤활유가 증발하므로써 베어링이 파괴되어 回轉子와 固定子가 충돌.

6) 不平衡運轉이 지속되므로써 한相 捲線이 燒損되어 單相運轉으로 돌입.

7) 缺相의 直接的 原因은 電源스위치나 Y-△起動器의 接觸불량, 퓨우즈의 1相 切斷, 半導體素子로 제어되는 경우에 있어서 1相의 不通⁵⁾ 등이다.

3. 不平衡運轉時의 電動機 解析

3.1 일반적인 誘導電動機 解析

각 相에 平衡 3相電壓이 공급되고, 空隙磁束이 正弦波分布이며 線型磁氣回路를 갖는다는 假定에서 誘導電動機의 파라메타를 그림 1의 d-q 軸 모델에 적용시켜 간략화하면 식(3-1)이 얻어진다.⁶⁾

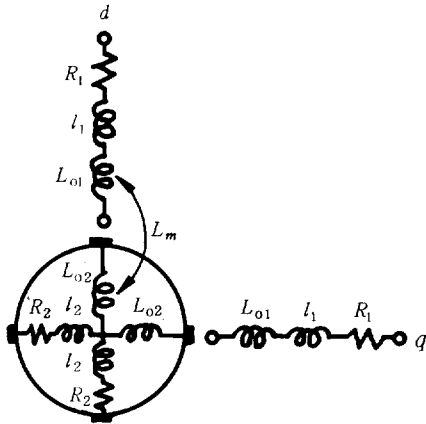


그림 1. 3相誘導電動機의 d-q 軸 모델

Fig. 1. d-q axis model of 3-phase induction motor

| | | | |
|----------|-----------|-------------------------|--------------------------|
| | | <i>ds</i> | <i>dr</i> |
| v_{ds} | <i>ds</i> | $R_1 + p(l_1 + L_{01})$ | pL_m |
| v_{dr} | <i>dr</i> | pL_m | $R_2 + p(l_2 + L_{02})$ |
| v_{qs} | <i>qs</i> | | |
| v_{qr} | <i>qr</i> | $-\omega' L_m$ | $-\omega'(l_2 + L_{02})$ |

| | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|----------|
| | <i>qs</i> | <i>qr</i> | |
| | $\omega' L_m$ | $\omega'(l_2 + L_{02})$ | i_{ds} |
| | $R_1 + p(l_1 + L_{01})$ | pL_m | i_{dr} |
| | pL_m | $R_2 + p(l_2 + L_{02})$ | i_{qs} |
| | | | i_{qr} |

(3-1)

여기서 正相분과 逆相분을 變換行列을 써서 2相 對稱軸으로 變換한 임피던스 行列은 식(3-2)와 같이 된다.

| | | |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| | <i>fs</i> | <i>fr</i> |
| \dot{Z} | $R_1 + j(x_1 + X_{01})$ | jX_m |
| | $j_s X_m$ | $R_2 + j(x_2 + X_{02})$ |
| | <i>bs</i> | |
| | <i>br</i> | |
| | <i>bs</i> | <i>br</i> |

(3-2)

| | | |
|--|-------------------------|-------------------------|
| | | |
| | | |
| | $R_1 + j(x_1 + X_{01})$ | jX_m |
| | $j(2-s)X_m$ | $R_2 + j(x_2 + X_{02})$ |

(3-2)

또, 식(3-1) 식(3-2)에서 電壓, 電流를 實效值로 나타내고 2次를 1次로 환산하여 '를 붙여 나타낸 正相분과 逆相분은 식(3-3), 식(3-4)와 같이 되며 이 正相분, 逆相분을 나타낸 等價回路는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

| | | | |
|----------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| | <i>fs</i> | <i>fr'</i> | |
| \dot{V}_{fs} | $R_1 + j(x_1 + X_{01})$ | jX_{01} | \dot{I}_{fs} |
| 0 | jX_{01} | $\frac{R_2'}{2} + j(x_2' + X_{02}')$ | \dot{I}_{fr}' |

(3-3)

| | | | |
|----------------|-------------------------|--|-----------------|
| | <i>bs</i> | <i>br'</i> | |
| \dot{V}_{bs} | $R_1 + j(x_1 + X_{01})$ | jX_{01} | \dot{I}_{bs} |
| 0 | jX_{01} | $\frac{R_2'}{2-s} + j(x_2' + X_{02}')$ | \dot{I}_{br}' |

(3-4)

그러나 3相不平衡運轉時의 極限的인 경우가 單相運轉이라고 생각할 수 있기 때문에 純單相誘導電動機의 d-q 軸을 f-b 軸으로 變換하면 電壓과 電流의 關係式은 식(3-5)와 같이 된다.

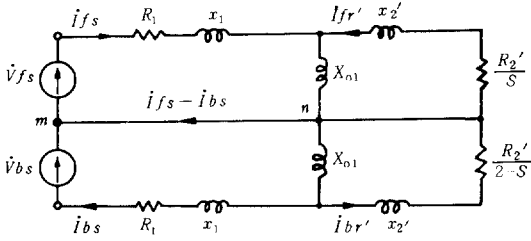


그림 2. 正相분과 逆相분을 포함한 等價回路
 Fig. 2. Equivalent circuit including positive and negative sequence component.

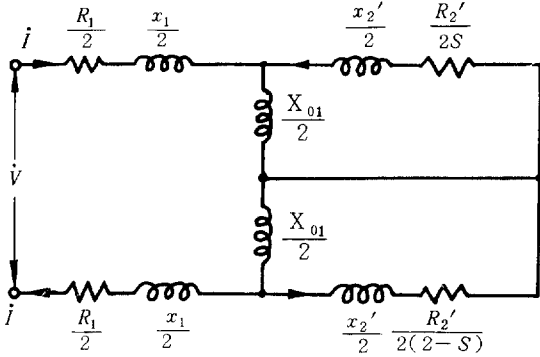


그림 3. 單相誘導電動機의 等價回路
 Fig. 3. Equivalent circuit of single-phase induction motor

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ds} &= \sqrt{2} \dot{I}_{fs} = \sqrt{2} \dot{I}_{bs} \\ \sqrt{2} \dot{V}_{ds} &= \dot{V}_{fs} + \dot{V}_{bs} \end{aligned} \quad (3-5)$$

그림 2의 等價回路에 식 (3-5)를 적용하면 m-n 간의 結線을 없앨 수 있고 \dot{V}_{ds} 를 端子電壓 \dot{V} 로, \dot{I}_{ds} 를 1次電流 \dot{I} 로 나타내면 그림 3과 같은 純單相誘導電動機의 等價回路를 얻을 수 있다.

電動機에 인가된 電壓을

$$v = V_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (3-6)$$

라 놓고 正相분과 逆相分 電壓을 얻기 위하여 Park's Two-Axis 變換을⁷⁾ 적용하면 식 (3-7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{fs} &= \sqrt{3} V_m \cos(\omega t + \alpha) \\ \dot{V}_{bs} &= -\sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \alpha) \end{aligned} \quad (3-8)$$

이때 토오크는 正方向과 逆方向 成分을 포함한 식 (3-8)과 같이 된다.

$$T = j \frac{1}{3} \omega L_m (\dot{I}_{fs} \dot{I}_{br} - \dot{I}_{fr} \dot{I}_{bs}) \quad [N \cdot m] \quad (3-8)$$

3.2 不平衡運轉의 例

3相誘導電動機가 不平衡運轉될 수 있는 例는 이 理論적으로 규명된 바 있고⁸⁾ 본 研究에서는 不平衡運轉으로 發生되는 故障을 保護하기 위한 方案을 모색하는 것이 目的이므로 不平衡運轉될 수 있는 모든 경우를 간추려 설명하면 다음과 같다.

3.2.1 入力電壓이 不平衡인 경우

3相電動機에 不平衡電壓을 印加하여도 電流의 零相分은 존재하지 않지만 逆相分 電壓, 電流가 존재하므로 토오크는 감소하게 된다.

3.2.2 缺相에 의해 單相運轉이 되는 경우

a. 固定子捲線의 Y結線 運轉中 缺相

그림 4에서와 같이 a相이 缺相되었다면 不平衡運

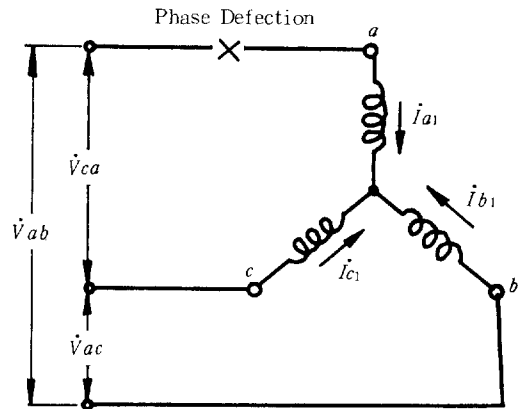


그림 4. Y結線 運轉中의 缺相
 Fig. 4. Phase deflection in Y-connection operating

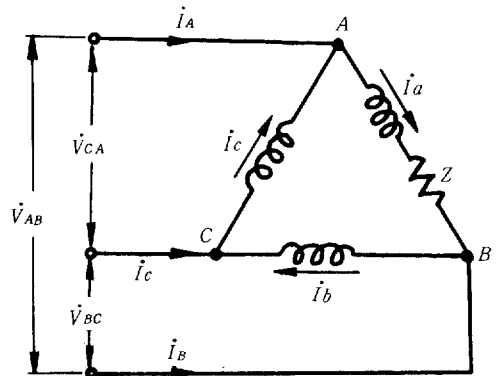


그림 5. Δ結線 運轉中 捲線의 斷線
 Fig. 5. Coil opening at Δ-connection operating

轉의 極限狀態인 單相運轉이므로 토오크는 급격히 감소한다.

b. 固定子捲線의 △結線 運轉中 한相 捲線의 斷線
그림 5에서 처럼 固定子捲線의 △結線運轉中 1相 捲線이 斷線되면 V結線負荷처럼 되어 斷線된 위치에 無限大의 임피던스를 삽입한 것과 같이 解析⁸⁾되며 이로인해 電流의 不平衡이 發生된다. 따라서 不平衡運轉은 逆相分토오크를 發生케하여 正相分토오크를 감소시킨다.

c. 固定子捲線의 △結線運轉中 電源側 1相의 缺相
그림 6처럼 固定子捲線을 △結線하여 運轉中 電源側에서 한相이 缺相되면 심한 不平衡에 이르는 單相運轉狀態가 되므로 토오크는 급격히 감소한다.

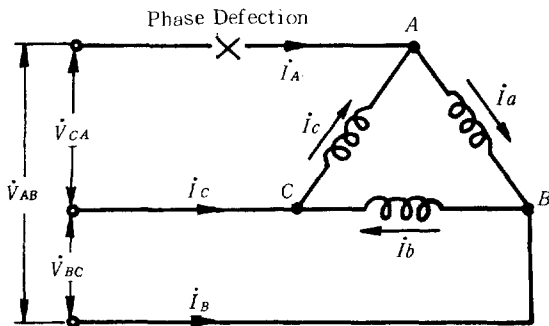


그림 6. △結線 運轉中の 缺相
Fig. 6. Phase deflection in Δ -connection operating

3.2.3 回轉子導體가 切断된 경우

심한 不平衡運轉을 長時間 지속하거나 빈번한 起動 停止를 반복하면 回轉子에 電氣의 충격을 주어 回轉子導體가 短絡環으로부터 切断된다. 이러한 경우에는 不平衡磁氣吸引力과 脈動토오크가 발생하여 回轉子에 異常振動을 일으키게 된다는 것을 伊藤元哉는 有限要素法으로 解析하였다.⁴⁾

그리고 3相籠型誘導電動機의 不平衡運轉에 대한 保護方案을 얻기 위해 지금까지 研究發表된 文獻들을^{4,9,10)} 중심으로 回轉子導體가 切断되었을 時的 電動機 特性을 종합하면 다음과 같다.

- 1) 正常狀態보다 不平衡磁氣吸引力과 脈動토오크는 커지며, 切断된 導體의 數에 비례하여 증가한다.
- 2) 切断된 導體의 數가 많더라도 이들이 서로 對稱的인 위치에 있으면 脈動토오크는 크지만 不平衡磁氣吸引力은 그리 커지지 않는다.
- 3) 切断된 導體의 주변에 있는 導體에는 切断된

導體에 흘러야 할 電流를 보상하기 위하여 電流密度가 증가한다.

4. 實驗用電動機 製作과 實驗結果 考察

4.1 實驗用電動機 製作

出力 750 [W], Y結線 380 [V], 4極의 3相誘導電動機의 固定子和 回轉子에 각각 缺相狀態의 特性을 檢출하기 위한 Search Coil 을 설치하였다.

固定子 Search Coil 은 同一 슬롯內의 主捲線上部에 短節2層捲으로 감았다.

回轉子 Search Coil 은 알루미늄다이캐스팅을 鎔解하여 제거하고 銅棒導體로 代替한 다음 역시 短節2層捲으로 감았다.

4.2 實驗方法

單相誘導電壓調整器 3 대를 Y結線하여 3相不平衡電壓을 얻어 電動機에 印加하였다. 缺相은 不平衡運轉의 極端的인 상태이므로 電壓不平衡率을 점차로 증가시키면서 缺相에 이를 때까지 토오크, 電流, 力率, 電力 및 回轉速度의 變化를 관찰하였고, 특히 固定子和 回轉子 Search Coil 의 檢出電壓 크기와 波形을 測定하였다. 이때 負荷는 渦流制動型 다이내모 메타를 이용하여 3相中 어느 한相에 定格電流가 흐르도록 하였다.

끝으로 回轉子의 中心線을 對稱으로 短絡環에 연결된 回轉子導體를 1개 切断하여 實驗하고 다시 바로 옆에 있는 導體를 하나씩 더 切断해가면서 위의 實驗을 반복하였다.

이와 같이 하는 것이 回轉子의 中心線을 기준으로 서로 對稱位置에 있는 導體를 切断하여 實驗하는 경우보다 不平衡이 심하게 發生하는 것을 實驗結果로 알았다.

4.3 實驗結果 考察

實驗에서 不平衡率은 NEMA에서 提示한 방식을 적용하였다.³⁾

$$\text{不平衡率} = \frac{\text{最大值} - \text{最小值}}{\text{平均值}} \times 100 [\%]$$

電壓不平衡率을 증가시키면서 電動機의 特性을 測定하여 單位的으로 換算한 것을 그림 7에 나타내었고, 이때 Search Coil 에 의해 측정된 檢출전압은 그림 8에 나타내었다.

1) 電流-아주 작은 供給電壓의 不平衡도 대단히 큰 電流不平衡을 일으킨다. 25 [%]의 電壓不平衡에

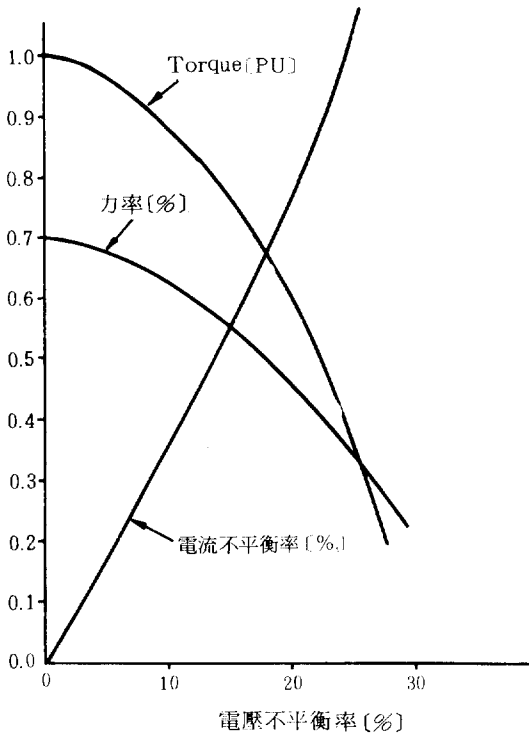


그림 7. 3相籠型誘導電動機의 不平衡電壓 運轉時 特性變化

Fig. 7. Characteristics variation at voltage unbalance operating of 3-phase squirrel-cage induction motor

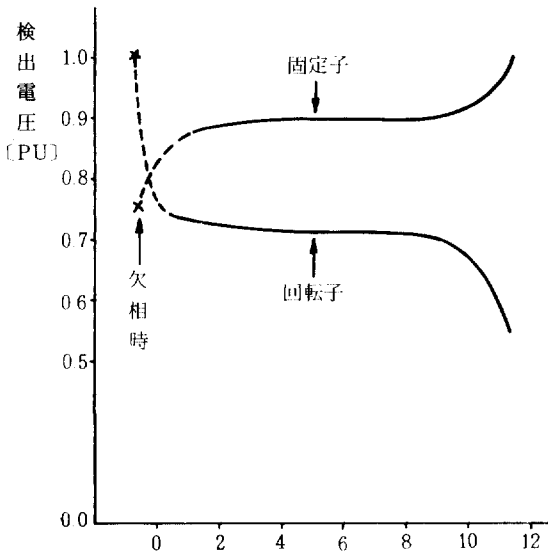
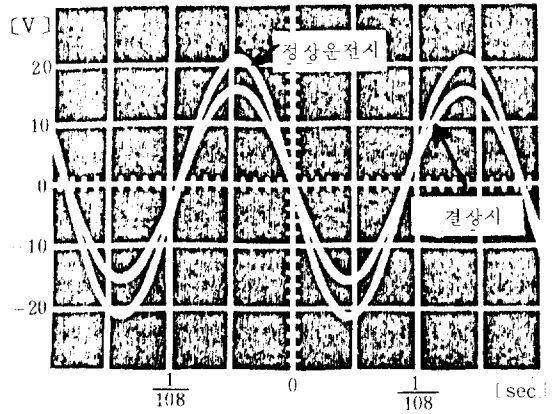
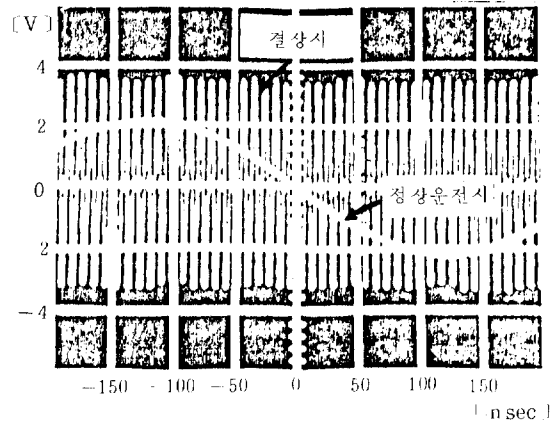


그림 8. Search coil의 檢出電壓

Fig. 8. Detecting voltage at search coil



(a) 固定子 Search coil 檢出電壓



(b) 回轉子 Search coil 檢出電壓

그림 9. Search coil의 檢出電壓 波形

Fig. 9. Waveforms of detecting voltage at search coil

서 100 [%]의 電流不平衡을 일으킨다.

2) 토오크-電壓不平衡이 커질 수록 토오크는 급격히 감소한다.

3) 力率-不平衡이 심할 수록 力率は 떨어지고 缺相時는 20 [%]이하로 된다.

4) 固定子 檢出電壓-固定子 Search Coil 에 誘起되는 電壓은 全負荷 平衡運轉時 14.8 [V], 缺相時 11.67 [V] (平衡時의 79 [%]) 이었다. 不平衡이 심할 수록 檢출전압은 감소하였으며 高調波成分의 함유량은 증가하였다. (그림 9 (b) 참조)

5) 回轉子 檢出電壓-回轉子 Search Coil 에 誘起된 電壓은 全負荷 平衡運轉時 1.56 [V], 缺相時 2.49 [V] (平衡時의 160 [%]) 이었다. 不平衡이

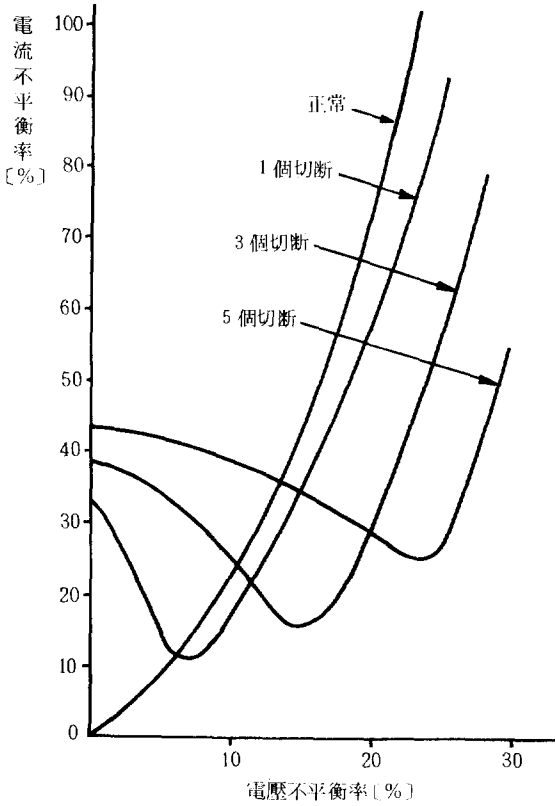


그림 10. 回轉子導體 切斷時的 電流特性
 Fig. 10. Current characteristic at opened rotor bar

심할수록 檢出電壓은 증가하였으며 슬립周波數는 점점 커져 敏相時에는 固定子 供給周波數의 약 2배가 되었다.

그림 8은 檢出電壓을 單位法으로 換算하고 대응하는 슬립으로 나타낸 것이다.

그림 9는 檢出電壓의 波形을 나타낸 것이다.

다음에는 回轉子導體를 切斷하고 電壓不平衡率을 증가시키면서 같은 實驗을 반복하였다.

1) 電流-不平衡이 심할 수록 감소하다가 最小點을 지나면 급격히 증가한다. 最小點의 위치는 切斷된 導體의 數에 따라 電壓不平衡이 심한 쪽으로 移動한다.

2) 토오크-不平衡이 심할 수록 증가하다가 最大點을 지나면 급격히 감소한다.

最大點의 위치는 切斷된 導體의 數에 따라 電壓不平衡이 심한 쪽으로 移動한다.

3) 力率-切斷된 導體의 數에 따라 不平衡率을 크게 하므로서 最高點을 얻을 수 있었다.

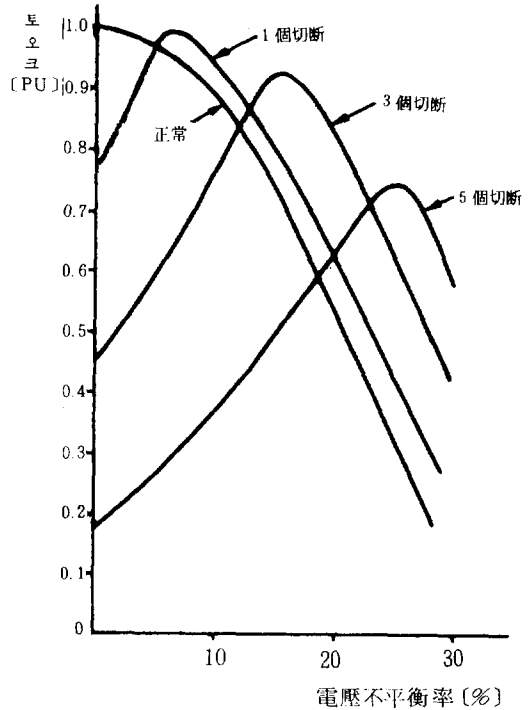


그림 11. 回轉子導體 切斷時的 토오크 特性
 Fig. 11. Torque characteristic at opened rotor bar

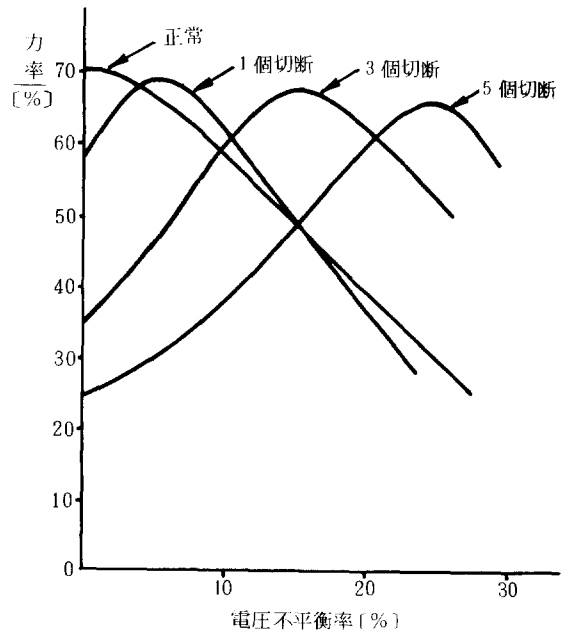


그림 12. 回轉子導體 切斷時的 力率 變化
 Fig. 12. Power factor or variation at opened rotor bar

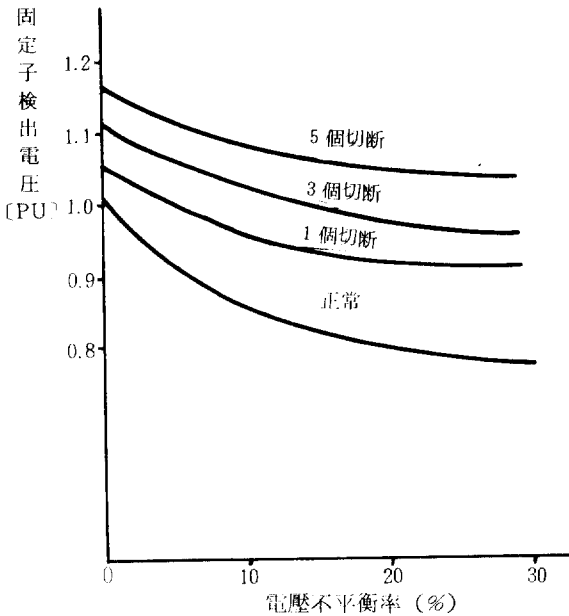


그림 13. 回轉子導體 切斷時 固定子 Search coil 의 檢出電壓

Fig. 13. Detecting voltage of stator search coil at opened rotor bar

4) 固定子 檢出電壓—切斷된 導體의 數에 따라 증가하고 不平衡率의 심할 수록 감소한다.

5. 結 論

本 研究는 小型籠型誘導電動機의 故障保護方案으로 製作工程에서 固定子 슬롯內에 적절한 Search Coil을 設置하여 電動機의 故障를 保護하고자 하는 方案의 提示이며 다음과 같은 研究結果를 얻었다.

1) 약간의 供給電壓의 不平衡도 큰 電流의 不平衡을 일으키며 토크도 급격히 감소한다.

2) 供給電壓의 不平衡時나 缺相運轉時 固定子 슬롯內에 설치한 Search Coil에 檢出되는 起電壓의 크기와 周波數는 正常運轉時와 매우 현저한 차이를 나타냈다.

3) 回轉子導體가 切斷되면 供給電壓이 平衡되어도 電流不平衡이 생기며 固定子 Search Coil의 檢出電壓은 증가한다.

4) Search Coil의 設置는 回轉子보다 固定子 슬롯內에 設置하는 것이 檢出에 용이하다.

그러므로 電動機 製作時 容量에 따라 固定子 슬롯內에 적절한 Search Coil을 設置하여 故障發生時의 현상을 檢出한다면 기존 缺相리레이보다 性能

이 우수하고 가격이 저렴한 電動機 保護裝置의 開發이 可能할 것이다.

參 考 文 獻

- 1) 朴旻鎬, 薛承基; "VV - VF 制御에 의한 3相誘導電動機의 高効率化 運轉에 관한 研究", 大韓電氣學會誌, Vol. 30, No. 7, pp. 454 - 459, July 1981.
- 2) R. J. Brighton, JR., P. N. Ranade; "Why overload relays do not always protect motors", IEEE trans. Industry Applications, Vol. IA - 18, No. 6, pp. 691 - 696, Nov./Dec. 1982.
- 3) Richard L. Nailen; "Voltage unbalance; how it happens, what is it doing to electric motors", IEEE Electrical Apparatus pp. 20 - 25, Jan. 1981.
- 4) 伊藤元哉外 4人; "誘導電動機의 不平衡磁氣吸引力과 토크에及ぼす回轉子バー切れの影響", 日本電氣學會論文誌B, Vol. 100, No. 1, pp. 1 - 8, 昭和55 - 1
- 5) 岩橋正義外 2人; "サイリスタ導通角制御による一次電壓不平衡制御誘導電動機의 運轉特性", 日本電氣學會論文誌B, Vol. 100, No. 12, (55 - B86) pp. 731 - 738, 昭和55 - 12.
- 6) 平島茂彦, 阿久津; "電動機의 制御と応用", 東京電氣大學出版局, pp. 18 - 23, 昭和55.
- 7) 任達鎬, 李殷雄, 張錫明, 具泰萬; "對稱 3相 2重籠型誘導電動機의 시뮬레이션", 大韓電氣學會誌, Vol. 30, No. 6, pp. 366 - 373, June 1981.
- 8) 朴旻鎬; "誘導機器", 東明社, pp. 303 - 313, 471 - 502, 1980
- 9) P. Vas; "Performance of three -phase squirrel -cage induction motors with rotor asymmetries", Period polytech, Elect., Vol. Eng. 19, No. 4, P. 309, 1975.
- 10) H. Hanafi & H. Jordan; "Über den einflu von stabund ringunter -brechungen auf den magnetischen schallpegel von käfigläufermotoren" Electrotech, Vol. Z - A97, No. 2. p. 101 1976.

記 号

ds, qs; 固定子의 直軸과 橫軸

d_r , q_r ; 回轉子の 直軸과 橫軸
 f_s , b_s ; 固定子の 正相分과 逆相分
 f_r , b_r ; 回轉子の 正相分과 逆相分
 R_1 , R_2 ; 固定子과 回轉子の 捲線抵抗
 l_1 , l_2 ; 固定子과 回轉子の 인덕턴스
 L_{o1} , L_{o2} ; 固定子과 回轉子の 漏洩인덕턴스
 $p = j\omega$; 微分演算子 ($\frac{d}{dt}$)
 ω_0 ; 同期角速度
 ω' ; 回轉子の 機械的 角速度

x_1 ; 固定子 리액턴스
 x_2' ; 2次를 1次로 換算한 리액턴스
 X_{o1} , X_{o2} ; 固定子과 回轉子の 漏洩리액턴스
 s ; 슬립
 V_m ; 印加電壓의 最大値
 v , i ; 電壓과 電流의 瞬時値
 I ; 電流의 實効値
 j ; 複素數의 虛數部