

高壓電動機의 SWITCHING SURGE 低減方案

金宗謙*, 李殷雄, 金一中
한국수자원공사, 충남대 충남대

The Switching Surge Reduction Device of High Voltage motor

Jong-Kyeom Kim, Eun - Woong Lee, Il - Jung Kim
KOWACO CHUNGNAM NAT. UNIV. CHUNGNAM NAT. UNIV.

Abstract - In recent years, Vacuum Circuit Breaker(VCB) has been widely used to enhance the confidence and at the same time to ease maintenance of waterworks equipment as the power supply breaker of high voltage motor. When making and breaking the sources as VCB the powerful surge voltage, repetitive reignition phenomenon resulted from exceeding inter-pole endurance voltage of CB, has occurred. It has transmitted to the winding of motor stator through the cable, and this surge voltage is repeated over and over again before finishing making and breaking action of CB according to cumulation of repetitive reignition surge, motor has become burned in the end. This paper describes surge voltage occurring in making and breaking of VCB as circuit parameters by transient phenomenon and examines closely the variance of peak values, wavefront-length, wavetail-length, when changing inductance and capacitance of a cable. Finally we will expect to protect motor winding breakdown from surge voltage through parallel connection of suitable-size in the motor.

I. 序 論

最近에 작은 空間에 受容할 수 있고, 信頼도가 높으며 補修點檢이 容易한 上下水道의 電源開閉器로서 真空遮斷器(VCB)가 널리 쓰이고 있다. 真空遮斷器는 電源의 投入와 遮斷時에 強力한 高周波 消弧力을 갖고 있기 때문에 電流가 零(ZERO)이 되기전에 強制的으로 零으로 만들려는 임의 서-지電壓이 發生하게 된다. [1, 2, 3, 4, 5]

이 서-지電壓이 電源側 케-블을 통해 電動機의 卷線端에 反復되어 傳達되면 電動機의 絶緣이 劣化되고, 終局에 가서는 破壞되는 原因이 되기 때문에, 이에 대한 對策을 마련하기 위해서 真空遮斷器의 開閉서-지電壓 解析[3] 및 서-지 低減方案[7, 19, 10] 活潑이 研究되었다. 특히 이 研究의 目的은 省 에너지 次元에서 電動機의 小型化, 低價格化, 高效率化를 위한 設計製作을 위해서도 強調되고 있다.

본 研究는 真空遮斷器로 高壓電動機에 電源을 投入할때 真空遮斷器와 高壓電動機 端子間에 構成되는 靜電容量과 誘導係數를 變化 시켜 開閉서-지電壓의 波高值, 波頭長, 波尾長을 調整할 수 있음을 理論的으로 証明한 것이다.

첫째로 高壓電動機에 連結한 電源供給 케-블의 固有임피던스를 考慮하여 構成한 回路에 發生하는 서-지電壓을 回路定數에 의해 解析한다.

둘째로 이 回路定數를 變化시켜 電動機端子에 到達하는 서-지電壓을 調整할 수 있음을 밝힌다.

II. 電動機 給電回路의 開閉過渡現象

電源을 投入하여 起動시키거나 電源을 遮斷하여 制動할 때 開閉서-지가 發生하는데, 이 開閉서-지는 力率이나 誘導性電流를 開閉할 때 처럼 急進展서-지現象이 일어난다. 이 開閉서-지電壓의 發生原因別로 分類하면[7]

- 投入時는
 - 回路定數에 의해 必然的으로 發生하거나,
 - 3 상 不平衡 電源을 投入할때 일어나는 것으로 分析할 수

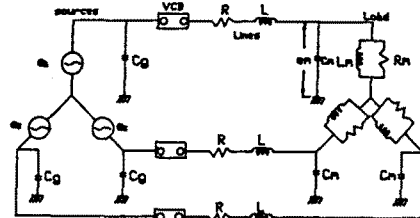
있으며,

- 遮斷時는
 - 電流遮斷(CURRENT CHOPPING),
 - 反復性 再發弧(REPETITIVE REIGNITION),
- 그리고, 誘發遮斷(INDUCED CHOPPING)으로 分析할 수 있다.

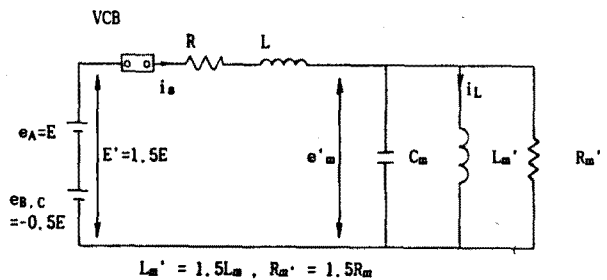
II - 1 投入時 發生하는 서-지電壓

1. 回路定數에 의해 發生서-지의 過渡現象 解析

그림(1)은 真空遮斷器의 投入時 일어나는 多重 再發弧 現象을 說明하기 위한 基本回路이다. 이 解析에서 回路에 供給된 電源은 交流이지만, 多重再發弧現象이 매우 빠른 時間에 일어나는 것으로 看做하여 直流電源이 印加되어 진 것으로 본다. [3]



(a) 실 回路에 대한 集中定數 모델 (3 #)
(a) Concentrated constants model for actual circuit(3 #)



(b) 等價回路(1 #)
(b) Equivalent circuit(1 #)

그림 1. 投入서-지 說明回路
Fig 1. Explaining circuit in making surge

그림 1 과 같은 回路의 電動機에 電源을 投入할때, 電源電壓(E)와 端子電壓(-0.5E)의 差異가 真空遮斷器의 內部電極사이에서 印加되는 負荷側 端子電壓이 遮斷器의 內部電界範圍內의 크기 일때는 安善點呼가 일어나지 않으며, 遮斷器內部電界보다 클때는 건디지 못하여 安善點呼를 일으키며 同時에 多重再發弧를 일으키게 되어 線路定數에 의한 高周波電流가 發生하게 된다.

그림 1 과 같은 回路에서 t = 0 에서 真空遮斷器를 投入하는 경우, C 의 端子電壓이 $e_m(0)$, L 의 電流가 $i_L(0)$ 로 된 R, L, C

에 대해 放電期間동안 電動機에 나타나는 電壓을 나타내는 電壓方程式은

$$e_r + e_L + e_C = E' - E_{ON} \quad L(di/dt) + Ri + (1/C) \int i dt = E' - E_{ON} \quad (1)$$

으로 나타내 진다.

여기서 C의 電荷 q에 관한 微分方程式이 電流, $i = (dq/dt)$ 이므로 式(1)에 代入하면

$$L(d^2q/dt^2) + R(dq/dt) + (1/C)q = E' - E_{ON} \quad (2)$$

로 되어 線型 2階 常微分方程式이며, 그 初期値는 $q_s = CE'$ ----- (3)

이다.

다음에 過渡項 q_t 를 구하기 위해 式(2)의 오른쪽 項을 "0"으로 놓은 式(4)를 구한다.

$$L(d^2q_t/dt^2) + R(dq_t/dt) + (1/C)q_t = 0 \quad (4)$$

이 式(4)에서 $d/dt = p$ 라 하고 過渡解를 $q_t = Ae^{pt}$ 라 假定하면 式(5)가 된다.

$$(Lp^2 + Rp + 1/C)Ae^{pt} = 0 \quad (5)$$

式(5)을 滿足하는 p를 구하면,

$$\therefore p = (-R/2L) \pm \sqrt{(R/2L)^2 - (1/LC)} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \quad (6)$$

로 되며, 式(4)를 滿足한다.

여기서 $\alpha = R/2L, \beta = 1/\sqrt{LC}$ 이다.

式(6)에서 振動의 경우 $\alpha < \beta$ 만을 考慮하므로 方程式의 두 근을 p_1, p_2 라 하면,

$$p_1 = -\alpha + j\beta \quad p_2 = -\alpha - j\beta \quad (7)$$

가 되어, 式(4)의 過渡解는

$$q_t = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (8)$$

로 되고 q의 一般解

$$q = q_s + q_t = CE' + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (9)$$

$$= CE' + K e^{(-\alpha + j\beta)t}$$

여기서 $K = a + jb = K e^{j\Phi}$ 로 表示할 수 있으며, a는 實數部, b는 虛數部이며, $\Phi = \tan^{-1}(b/a)$ 이며, 式(9)에서 A_1, A_2 는 過渡項의 常係數이다.

$t = 0$ 에서 C에 充電된 電荷 q를 直流電壓으로 看做한 E_{ON} 에 의해 CE_{ON} 이고 式(9)는 實數部만 考慮되므로 式(9)는

$$CE_{ON} = CE' + b \quad (10)$$

로 된다.

또, 式(9)에서 電流 i를 구하면

$$i = (dq/dt) = \uparrow(-\alpha + j\beta) K e^{(-\alpha + j\beta)t} \quad (11)$$

로 된다.

그런데 $t = 0$ 에서 i는 初期값 I_{ON} 이고, 式(11)이 成立하려면 오른쪽 項도 實數部만 存在하여야 하므로

$$I_{ON} = \uparrow(-\alpha + j\beta)(a + jb) = a\beta - b\alpha \quad (12)$$

$$\therefore a = I_{ON} / \beta + (\alpha/\beta)(CE_{ON} - E')$$

로 된다. 따라서

$$K = \sqrt{a^2 + b^2} \quad e^{j\Phi}$$

$$= C(E_{ON} - E') \left[1 + \frac{\left(\alpha + \frac{I_{ON}}{C(E_{ON} - E')} \right)^2}{\beta^2} \right]^{1/2} e^{j\Phi}$$

$$= C(E_{ON} - E') \left[1 + \frac{\left(\delta + \frac{Z I_{ON}}{(E_{ON} - E')} \right)^2}{1 - \delta^2} \right]^{1/2} e^{j\Phi} \quad (13)$$

$$\Phi = \tan^{-1}(b/a) = \tan^{-1} \frac{C(E_{ON} - E')}{(I_{ON}/\beta) + (\alpha/\beta)C(E_{ON} - E')}$$

$$= \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{\delta + \frac{Z I_{ON}}{E_{ON} - E'}} \right] \quad (14)$$

이며, 여기서 $\delta = R/2Z_1$ 이고, $Z_1 = \sqrt{L/C}$ 이다. 그러므로 式(9)는

$$\therefore q = CE' + C(E_{ON} - E') \left[1 + \frac{\left(\delta + \frac{Z I_{ON}}{E_{ON} - E'} \right)^2}{1 - \delta^2} \right]^{1/2} e^{j\Phi} e^{(-\alpha + j\beta)t}$$

$= CE' - C(E' - E_{ON}) A e^{(-\alpha t)} \sin(\beta t + \Phi)$ ----- (15) 로 되어 結果의 으로 電動機 端子에 到達하는 電壓은 式(16)과 같이 된다.

$$e_m = q/c = E' - (E' - E_{ON}) A e^{(-\alpha t)} \sin(\beta t + \Phi) \quad (16)$$

$$\text{여기서, } A = \left[1 + \frac{\left(\delta + \frac{Z I_{ON}}{E_{ON} - E'} \right)^2}{1 - \delta^2} \right]^{1/2} \text{이다.}$$

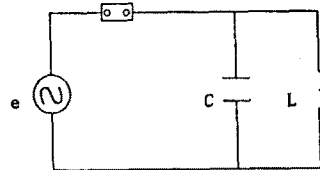
II - 2 遮斷時 發生하는 서-지電壓

1. 電流遮斷

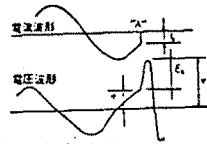
通電中에 있는 開閉器를 閉하면 흐르던 電流가 減少하여 零點까지 繼續 흐르다가 零點에서 遮斷된다. 그런데 작은 電流일 換過 接點間에 發生하는 아-크는 強力한 消弧力 때문에 不安定하게 되고 正弦波 電流가 零點이 되기전에 消弧되어 버리는 電流遮斷現象이 일어나고, 이때에 서-지 電壓이 發生한다.

이와같은 現象이 單相回路에서 發生하는 모습을 나타내면 그림 2과 같다.

VCB



(a) 等價回路
(a) Equivalent circuit



(b) 電流, 電壓 波形
(b) Waveform of current and voltage

그림 2. 電流遮斷 서-지
Fig. 2 Current chopping surge

그림 2(b)에서 A點에서 電流遮斷이 發生하고, 그 값을 I_c 라 하면 코일의 等價인덕턴스 L의 貯藏에너지가 코일의 等價 캐패시턴스 C로 變換되고, 그때의 L, C 사이에 共振이 發生하여, 서-지 전압 V가 開閉器를 閉때의 電流遮斷值 I_c , 負荷側 對地電壓(開閉時의 瞬時電壓)을 e라 하면, 다음 式(17)을 얻을 수 있다.

$$(1/2) C \cdot V^2 = (1/2) L \cdot I_c^2 + (1/2) C \cdot e^2$$

$$V = \sqrt{L/C} \cdot I_c = Z \cdot I_c = \sqrt{(L/C) \cdot I_c^2 + e^2} \quad \text{---- (17)}$$

여기서 Z 는 負荷側의 서-지 임피던스($\sqrt{L/C}$)이며, 그 크기는 負荷의 種類, 케-블의 길이 등에 의해 決定되어진다.

2. 反復性 再發弧(REPETITIVE REIGNITION)

電流遮斷에 의한 서-지가 發生했을 때 遮斷器의 極間 絶緣이 充分히 回復하지 않으면 再發弧하게 되고 條件에 따라서는 다시 消弧作用이 일어난다. 이와같이 短時間內에 發弧와 消弧가 여러번 反復되는 反復再發弧가 일어난다. 이와같은 現象은 再發弧時 回路에 흐르는 高周波 電流가 強制的으로 零이 되게하는 것은 遮斷器의 高周波 消弧作用 때문이다. [1, 2, 3, 4, 5]

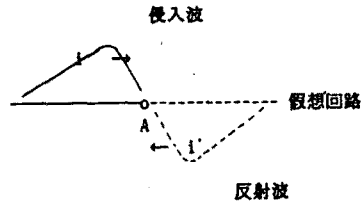
3. 誘發遮斷

誘發遮斷은 第 1 相(u 相)이 電流 0 點에서 遮斷하면 거의 同時에 遮斷되는 第 2 相, 第 3 相(v 相, w 相)은 큰 電流에서 遮斷하게 되어 큰 서-지電壓이 發生한다. 이 現象은 遮斷 第 1 相이 遮斷直後에 再發弧하고, 이때 흐르는 高周波 電流가 다른상의 使用周波電流에 重疊해서 強制的으로 電流零點을 만들고 그 零點에서 電流遮斷이 發生하는 것이다.

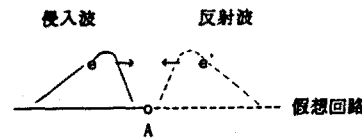
III. 進行波의 反射 및 透過

進行波는 線路의 終端 및 케-블의 接續點과 같이 서-지임피던스가 다른 變位點에 있어서 反射 및 透過 現象을 나타낸다.

1) 線路開放端의 境遇(回轉機와 같이 높은 임피던스가 接續되어 있는 경우)



(a) 開放端 電流進行波
(a) Current travelling waveform on open-ended



(b) 開放端 電壓進行波
(b) Voltage travelling waveform of open-ended

그림 3. 開放端의 電流 및 電壓 進行波
Fig 3. Current and voltage travelling waveform of open-ended

그림 3 과 같이 왼쪽에서 波高值로서의 進行波가 開放端 A 에 到達한다고 하면, A 點은 開放端으로서 電流는 흐르지 않는다. 즉, 그림 3(a)의 右側에 想定한 假想回路에서 同一波形的 逆符號의 電流值 - i 가 A 點에 同時에 進入한 것이 된다. 따라서, 開放端에서 電流波高值는 본래대로 符號가 反轉한 電流波가 되어 進行한다. 電壓波는 開放端에서 逆方向으로 (-)符號의 電流波가 나아가는 것으로서 逆方向으로 나아가는 電流波와는 符號反對의 電壓波 e' 를 그림 3(b)와 같이 考慮하여 計算한다. 즉, 電壓波는 波形, 符號가 그대로 反射되는 것이되는 것으로 2 倍의 電壓이 回轉機器 端子에 나타나는 結果를 지닌다.

2) 서-지 임피던스가 다른 線路의 接續點인 境遇(케-블과 回轉機器의 境遇)

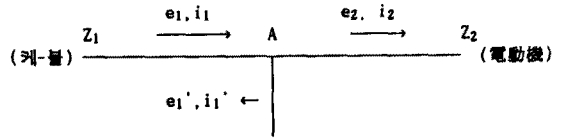


그림 4. 서-지 임피던스 變位點의 서-지 進行波
Fig 4. surge travelling waveform of displacement point in surge impedance

그림 4 과 같이, 서-지임피던스 Z1 및 Z2 의 線路 A 에, Z1 에서 e1, i1 進行波가 到達하는 경우, 反射波를 各各 e1', i1' 透過波를 各各 e2, i2 라 하면 식(18) 이 成立된다.

$$i_2 = i_1 - i_1' \quad \text{---- (18)}$$

또, 各各의 電壓波, 電流波와 서-지 임피던스와 사이에는 식(19) 이 成立한다.

$$\begin{aligned} e_1 &= Z_1 i_1 \\ e_1' &= Z_1 i_1' \\ e_2 &= Z_2 i_2 \end{aligned} \quad \text{---- (19)}$$

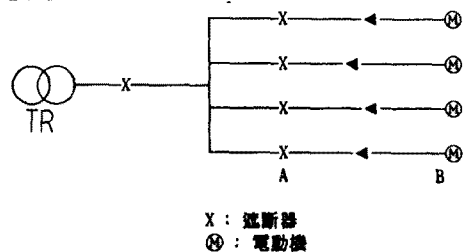
式(18)을 式(19)에 代入해서 풀면 反射波 및 透過波는 表 1 과 같이 된다.

表 1. 進行波의 反射 및 透過係數⁽¹⁾

TABLE 1. Reflection and transit coefficient of travelling waveform

區 分	反射係數	透過係數
電壓進行波	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$	$\frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2}$
	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$	$\frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$

3) 케-블연결 電動機 임피던스



X : 遮斷器
⊗ : 電動機

그림 5. 代表的인 케-블 連結 電動機 시스템
Fig 5. Typical cable-connected motor system

正確하게 計算된 크기를 가진 急進展 過渡電壓波形이 電動機 케-블에 透過할때 電動機 端子에 나타나는 電壓波形 V_m [10] 은

$$V_m = V_i \frac{2 Z_m \text{ (or } Z_2)}{Z_c + Z_m \text{ (or } Z_1 + Z_2)} [V] \quad \text{---- (20)}$$

이 되고, 여기서 Z_m (or Z_2) 은 電動機의 서-지 임피던스이고, V_i 는 點呼가 일어난는 瞬間의 瞬時값이고, Z_c 는 케-블 서-지 임피던스 이다.

電動機와 케-블 서-지 임피던스에 대한 電動機임피던스가 케-블 임피던스보다 수십배 程度 크므로 負荷側에서 보이면은 開放으로 看做되어 結局 그대로 反射되는 形態가 되므로 大部分의 電動機 시스템 條件下에서는 遮斷器에서 케-블로 透過하는 電壓의 거의 두배 程度의 서-지 電壓이 電動機 端子에 到達하게 된다.

IV. 시뮬레이션에 의한 分析과 低減對策

2 章에서 解析 定理인 式(16), (20) 에서 모델로 選定해 시뮬레이션한 結果를 分析하면 다음과 같다.

이 시뮬레이션에 使用된 값들은 그림 1 에서 나타낸 定數들은 表 2 와 같고, 抵抗(R)은 케-블의 固有定數이며, 誘導係數(L)과 靜電容量(C1)은 케-블의 서-지特性式에서 算出되고, 靜電容量(C)는 케-블 서-지 特性 靜電容量(C1)과 電動機 自體의 靜電容量(C2)의

表 2. 시뮬레이션에 사용된 값
TABLE 2. Values used in Simulation

區 分	特 性 値
R : 케-블 自體 抵抗	
L : 케-블 서-지特性 誘導係數	$L = (\mu_0/2\pi) * (\log_e(d_2/d_1))$
C ₁ : 케-블 서-지特性 靜電容量	$C = (2\pi \epsilon_0) * (\log_e(d_2/d_1))$
C ₂ : 電動機 自體 靜電容量	$9.3 * 10^{-3} (\mu F)$
R _m : 電動機 自體 抵抗	20(kΩ)
L _m : 電動機 自體 誘導係數	0.1(H)
C ₃ : 追加並列 靜電容量	0.3(μF)

*. d₂: 실드까지 半徑 d₁: 中心導體半徑
= 8.65, 10.0, 16.5 = 4.65, 6, 12.

IV - 1. 電動機 端子的 並列 캐패시턴스의 效果

負荷側 端子에 나타나는 서-지電壓의 波高값과 波頭長에 대한 結果를 알아보기 위해 負荷에 並列로 靜電容量(C₃)을 追加할 경우에 대한 結果를 다음 두가지 方法으로 調査하였다.

1) 케-블길이 變化에 따른 並列캐패시턴스 追加時

다음은 眞空遮斷器로서 케-블을 통해 負荷側 電動機端子에 電壓을 供給하는 경우에 負荷側端子에 並列로 靜電容量을 挿入하면 靜電容量을 追加하지 않은 경우보다도 波高值에 到達하는 波頭長이 길어진다. 앞에서 케-블 길이 가 긴 경우보다 짧은때가 波頭長이 짧아지고, 波高값은 거의 2.5[PU] 未滿인 것을 알 수 있었다. 같은 길이에서 斷面積이 클수록 波頭長 및 波尾長이 짧다는 것을 알 수 있었다.

같은 길이에서 케-블規格이 커짐에 따라 캐패시턴스의 追加로 共 振周波數가 커지면, 負荷側에 캐패시턴스를 追加하지 않은 경우에 비해서 상당히 작아 대개 수 십 K[Hz] 範圍以內에서 動作한다.

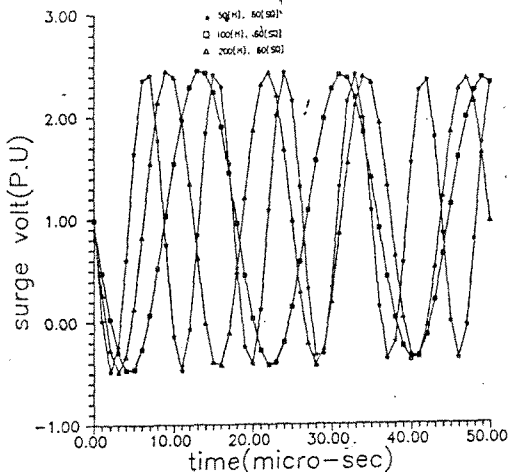


그림 6. 케-블 길이 변화와 캐패시턴스 추가시에 v-t 曲線
Fig 6. V-t curve in added capacitance and cable-length transfer

2) 케-블 規格의 變化에 따른 並列캐패시턴스 追加時

이 경우는 케-블길이의 變化에 따른 結果를 나타내는 것으로서 同一한 길이에서 斷面積이 큰것이 波頭長 및 波尾長에 到達하는 時間이 짧다는 것을 알 수 있다. 케-블길이의 變化에 따라 길이를 變化시켜 延長해 가보면 케-블 길이 가 길어질수록 波頭長과 波尾 長이 길어짐을 알 수 있다.

이때의 波高值은 역시 캐패시턴스를 並列로 붙이지 않은 경우에 비해서 거의 變化를 가지지 않으나, 거의 2.5[PU] 未滿으로 나타 내진다. 또한 같은 斷面積에서 길이 가 길수록 共振周波數가 작아 진다는 것을 알 수 있다.

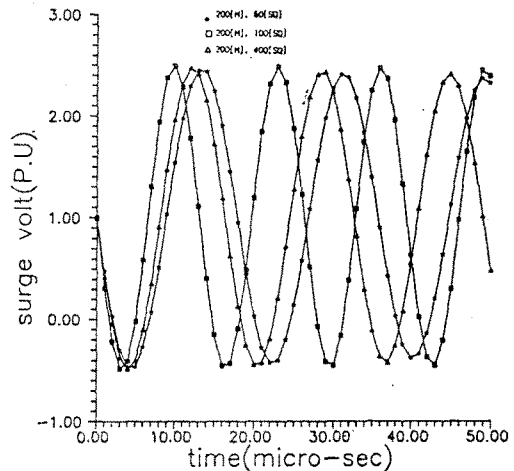


그림 7. 케-블規格 변화와 캐패시턴스 추가시에 v-t 曲線
Fig 7. V-t curve in adding capacitance and cable-diameter transfer

V. 結 論

電動機에 電源을 供給하기 위해 遮斷器를 投入할 시 생기는 過波 電壓은 傳播概念에 의하면 供給電壓의 2 倍以上이 電動機 端子에 印加되지만, 실제로 電動機나 變壓器와 같이 서지-임피던스가 상 당히 높은 경우 荷側의 端子는 開放回路로 看做되어 屈折 및 反射의 現象에 의해 실제 傳達된 供給電壓의 5 배 정도가 負荷側 端子 에 傳達되어 電動機 固定子 卷線이 건널 수 있는 限界를 超過하는 事實을 알 수 있다.

이같은 사실에 대해 電動機 端子에 나타나는 過波電壓을 減少시 키기 위한 方法으로 負荷側 端子에 가장 가까운 곳에 對地靜電容 量과 並列로 캐패시터를 挿入하는 方法을 컴퓨터 시뮬레이션을 통 해 調査한 바로는 波高값을 減少시키는 效果보다는 같은 波頭長에 서 波尾長까지의 時間을 延長시키는 效果를 가진다는 것을 알 수 있었다. 이는 電動機負荷에 電源을 眞空遮斷器를 거쳐 케-블을 통 해 負荷側에 높은 波高값과 빠른 波尾長이 到達할때 그 保護對策을 樹立하기 위해서 並列로 캐패시턴스를 追加하여야 할 경우에 대한 代案을 提示할 수 있는 方法으로서 波頭長과 波尾長과의 相互關係 를 充分히 考慮하여야 한다.

參考文獻

- [1] 東芝 技術資料, "開閉서-지 現象의 理論的 解說", 1983.
- [2] K.Yokokura et al., "Multiple Restriking Voltage effects in A Vacuum Circuit Breaker on Motor insulation", IEEE Trans. on Power Apparatus & System, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1940~1947, 1981.
- [3] Ikushi Kano et al., "Switching Surge Phenomena in Induction Motor Windings and Their Endurance" Hitachi Review, Vol. 24, No. 5, pp. 225~232, 1975.
- [4] Allan Greenwood et al., "Voltage Escalation in Vacuum Switching Operations", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1698~1706, Oct, 1988.
- [5] M. Murano et al., "Voltage Escalation in Interrupting Inductive Current by Vacuum Switches" IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. 93, No. 1, pp 264~271, 1973.
- [6] 電氣設備技術計算 핸드북編輯委員會編, 電氣書院, pp. 9 ~ 28, 1980.
- [7] Mikio Okawa, Hiroshi Koike " Switching Surge and Countermeasure in Vacuum Switching Devices" Toshiba Review, Vol. 30, No. 12, pp17~21, 1975.
- [8] 赤尾保男, "過度現象論", 廣川書店, 1989.
- [9] D.F.Shankle et al., "Surge Protection for Pipeline Motors" IEEE Trans. on Industry and General Applications, Vol. IGA-4, No. 2, pp. 171~176, 1968.
- [10] R.E.Pretorius, "Optimised Surge Suppression on High Voltage Vacuum Contactor Controlled Motors" IEE Third International Conference on 'Sources and Effects of Power System Distribution', pp. 65~70, 1982.