論 文
12-2

凸極同期機의 2相間短絡時에 非短絡相에 誘起되는 端子電壓

(Open-Phase Voltage for Line-to-Line Fault)

李 晩 榮 *

序 言

凸極型同期機를 無負荷狀態로 運轉을 할때 갑자기 2相間에 短絡이 突發한 경우 다른 開路相端子에 誘起되는 open-phase voltage의 過渡狀態를 究明하는데 本論文의 目的이 있다. 于先 電機子電壓의 直軸分과 橫軸分을 求하기 爲하여 Blondel氏가 提唱한 理論을 matrix form으로 展開하여 그의 基本電壓方程式을 確立시키고 이어서 相間短絡電流를 求해가지고 開路相端子에 誘起되는 異常電壓, 即 open-phase voltage의 値를 $e_a = e_d \cos\theta - e_q \sin\theta + e_o$의 關係式에 依據해서 求해보자는 것이다.

論述上의 便宜를 圖謀키 爲해 몇가지 假定을 마련하는것이 順序라고 본다.

① 制動捲線이 없는 凸極同期機를 取扱하고, ② 飽和現象을 無視하며, ③ 直軸上에 主界磁가 存在하는것으로 看做하며, ④ 電機子回路의 抵抗은 僅少値임으로 時定數에 限해서만 影響을 주는 것 以外에는 計算上에서 이를 無視하고, ⑤ 亦是 計算에 나오는 모든 量은 per-unit notation을 使用하고, ⑥ 零相分은 不考慮하며, ⑦ 끝으로 代表的인 同期機定數를 $x_d = 0.78$, $x'_d = 0.21$, $x_q = 0.48$ 및 $E = 1$로 定해서 究明해보자는 것이다.

本 論

一般的으로 電機子의 voltage drop을 $e = p(li) + ri = -p\phi + ri$로 쓸 수 있다면 voltage rise는 $e = p(-li) - ri = p\phi - ri$로 表示할 수 있다. 但 $p = \frac{d}{dt}$, 그러므로 電機子 各相에 誘起되는 電壓은

$$\begin{cases} e_a = p\,\phi_a - r\,i_a \\ e_b = p\,\phi_b - r\,i_b \\ e_c = p\,\phi_c - r\,i_c \end{cases}$$

로 表示되며 여기서 相別鎖交磁束은

$$\phi_j = -l_{ja}\, i_a - l_{jb}\, i_b - l_{jc}\, i_c, \quad j = a, b, c$$

이다.

이것들을 一括해서 한個의 式으로 쓰면

$$e_p = p\phi_p - ri_p, \qquad p = a, b, c \cdots\cdots(1)$$

이 된다.

다음에는 相磁束, 相電流 및 相電壓에 關한 Blondel氏의 matrix 方程式을 紹介해 보면

$$\phi_B = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta-120) & \frac{2}{3}\cos(\theta+120) \\ -\frac{2}{3}\sin\theta & -\frac{2}{3}\sin(\theta-120) & -\frac{2}{3}\sin(\theta+120) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = A\cdot\phi_p \cdots\cdots(2)$$

$$i_B = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta-120) & \frac{2}{3}\cos(\theta+120) \\ -\frac{2}{3}\sin\theta & -\frac{2}{3}\sin(\theta-120) & -\frac{2}{3}\sin(\theta+120) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = A\cdot i_p \cdots\cdots(3)$$

및

$$e_B = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta-120) & \frac{2}{3}\cos(\theta+120) \\ -\frac{2}{3}\sin\theta & -\frac{2}{3}\sin(\theta-120) & -\frac{2}{3}\sin(\theta+120) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = A\cdot e_p \cdots\cdots(3)$$

* 漢陽工大 敎授

等으로 表示되며 matrix A 의 inverse matrix A^{-1} 은

$$A^{-1}=\frac{\begin{bmatrix}\alpha_{aa} & -\alpha_{ab} & \alpha_{ac}\\ -\alpha_{ba} & \alpha_{bb} & -\alpha_{bc}\\ \alpha_{ca} & -\alpha_{cb} & \alpha_{cc}\end{bmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta-120) & \frac{2}{3}\cos(\theta+120)\\ -\frac{2}{3}\sin\theta & -\frac{2}{3}\sin(\theta-120) & -\frac{2}{3}\sin(\theta+120)\\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3}\end{vmatrix}}$$

로 求해질것이고 A^{-1} 의 分母行列式의 값은 $2\sqrt{3}/9$ 으로 計算되고 分子 matrix 의 各 成分의 값들은

$$\alpha_{aa}=\begin{vmatrix}-\frac{2}{3}\sin(\theta-120) & -\frac{2}{3}\sin(\theta+120)\\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3}\end{vmatrix}$$

$$=\frac{2\sqrt{3}}{9}\cos\theta$$

$$-\alpha_{ab}=\begin{vmatrix}\frac{2}{3}\cos(\theta-120) & \frac{2}{3}\cos(\theta+120)\\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3}\end{vmatrix}$$

$$=-\frac{2\sqrt{3}}{9}\sin\theta$$

$$\vdots$$

$$\alpha_{bb}=\begin{vmatrix}\frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta+120)\\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3}\end{vmatrix}$$

$$=-\frac{2\sqrt{3}}{9}\sin(\theta-120)$$

$$\vdots$$

$$\alpha_{cc}=\begin{vmatrix}\frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta-120)\\ -\frac{2}{3}\sin\theta & -\frac{2}{3}\sin(\theta-120)\end{vmatrix}=\frac{2\sqrt{3}}{9}$$

과 같이 求해지므로 結局

$$A^{-1}=\frac{\begin{bmatrix}\frac{2\sqrt{3}}{9}\cos\theta & -\frac{2\sqrt{3}}{9}\sin\theta & \frac{2\sqrt{3}}{9}\\ \frac{2\sqrt{3}}{9}\cos(\theta-120) & -\frac{2\sqrt{3}}{9}\sin(\theta-120) & \frac{2\sqrt{3}}{9}\\ \frac{2\sqrt{3}}{9}\cos(\theta+120) & -\frac{2\sqrt{3}}{9}\sin(\theta+120) & \frac{2\sqrt{3}}{9}\end{bmatrix}}{\frac{2\sqrt{3}}{9}}$$

이 되어서 A^{-1} 는 다음과 같이 된다.

$$A^{-1}=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta & 1\\ \cos(\theta-120) & -\sin(\theta-120) & 1\\ \cos(\theta+120) & -\sin(\theta+120) & 1\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}\cos\theta_a & -\sin\theta_a & 1\\ \cos\theta_b & -\sin\theta_b & 1\\ \cos\theta_c & -\sin\theta_c & 1\end{bmatrix}\cdots\cdots(5)$$

그런데 $A^{-1}\cdot A=1$ 인 故로 式 (2), (3) 및 (4)는 各各 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi_p=A^{-1}\cdot\phi_B\cdots\cdots(6)$$

$$i_p=A^{-1}\cdot i_B\cdots\cdots(7)$$

$$e_p=A^{-1}\cdot e_B\cdots\cdots(8)$$

式 (6), (7)을 式 (1)에 代入함으로써

$$e_p=p(A^{-1}\cdot\phi_B)-r(A^{-1}\cdot i_B)\cdots\cdots(9)$$

의 關係式을 얻게된다. 于先 式(9)의 左邊을 式(8)로 代置한後 matrix A 를 兩邊에 連乘해줌으로서

$$e_B=A\cdot p(A^{-1}\cdot\phi_B)-ri_B\cdots\cdots(10)$$

의 matrix 方程式을 얻게된다. 그런데 여기서 電機子抵抗 r 는 常數인 故로

$$A\cdot r\cdot A^{-1}=r\cdot A\cdot A^{-1}=r$$

의 關係를 利用한것은 勿論이다. 實際로 式(10)을 展開해서 Blondel 電壓方程式을 求해보기로 한다.

$$A^{-1}\cdot\phi_B=\begin{bmatrix}\cos\theta_a & -\sin\theta_a & 1\\ \cos\theta_b & -\sin\theta_b & 1\\ \cos\theta_c & -\sin\theta_c & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\phi_d\\ \phi_q\\ \phi_o\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}\cos\theta_a\ \phi_d-\sin\theta_a\ \phi_q+\phi_o\\ \cos\theta_b\ \phi_d-\sin\theta_b\ \phi_q+\phi_o\\ \cos\theta_c\ \phi_d-\sin\theta_c\ \phi_q+\phi_o\end{bmatrix}$$

$$A\cdot p(A^{-1}\cdot\phi_B)=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}\cos\theta_a & \cos\theta_b & \cos\theta_c\\ \sin\theta_a & -\sin\theta_b & -\sin\theta_c\\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{bmatrix}\cdot$$

$$\begin{bmatrix}\cos\theta_a p\phi_d-\phi_d\sin\theta_a p\theta-\sin\theta_a p\phi_q-\phi_q\cos\theta_a p\theta+p\phi_o\\ \cos\theta_b p\phi_d-\phi_d\sin\theta_b p\theta-\sin\theta_b p\phi_q-\phi_q\cos\theta_b p\theta+p\phi_o\\ \cos\theta_c p\phi_d-\phi_d\sin\theta_c p\theta-\sin\theta_c p\phi_q-\phi_q\cos\theta_c p\theta+p\phi_o\end{bmatrix}$$

이것을 簡單히 整理하면

$$A\cdot p(A^{-1}\cdot\phi_B)=\begin{bmatrix}p\,\phi_d-\phi_q p\,\theta\\ p\,\phi_q+\phi_d p\,\theta\\ p\,\phi_o+\ \ 0\end{bmatrix}$$

이 되며

또

$$e_B=\begin{bmatrix}e_d\\ e_q\\ e_o\end{bmatrix}$$

와

$$i_B=\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\\ i_o\end{bmatrix}$$

等을 (10)式에 代入함으로써

$$\begin{bmatrix}e_d\\ e_q\\ e_o\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}p\,\phi_d-\phi_q\,p\,\theta\\ p\,\phi_q+\phi_d\,p\,\theta\\ p\,\phi_o+\ \ 0\end{bmatrix}-r\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\\ i_o\end{bmatrix}$$

或은

$$\begin{bmatrix}e_d\\ e_q\\ e_o\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}p\,\phi_d-p_q\,p\,\theta-r\,i_d\\ p\,\phi_q+\phi_d\,p\,\theta-r\,i_q\\ p\,\phi_o+\ \ 0\ \ -r\,i_o\end{bmatrix}\cdots\cdots(11)$$

으로 表示되어 結局 直軸, 橫軸 및 零相軸의 各 電壓成分은

$$e_d = p\,\psi_d - \psi_q\,p\,\theta - r\,i_d \quad \cdots\cdots(12)$$

$$e_q = p\,\psi_q + \psi_d\,p\,\theta - r\,i_q \quad \cdots\cdots(13)$$

$$e_o = p\,\psi_o - r\,i_o \quad \cdots\cdots(14)$$

等으로 分離된다. Blondel 氏의 matrix 方程式 (11)中의 ψ_d, ψ_q 및 ψ_o 等을 i_d, i_q 및 i_o 等으로 置換해서 電壓과 磁束과의 關係를 電壓과 電流와의 關係로 誘導變形해본다. 勿論 實際의 同期機에 있어서는 3相과 界磁回路를 包含해서 都合 6 個의 相互誘導(Mutual inductance)가 存在할것이로되 同期機를 直軸, 橫軸 및 零相軸 等으로 分離해서 解析하는 假想的인 경우에는 直軸과 界磁回路 間에만 限해서 單 1 個의 mutual inductance L_{df} 가 存在할것이다. 따라서 鎖交磁束의 per-unit 方程式은 다음과 같이 表示된다.

$$\psi_d = L_{df}\,i_f - L_d\,i_d \quad \cdots\cdots(15)$$

$$\psi_q = -L_q\,i_q \quad \cdots\cdots(16)$$

$$\psi_o = -L_o\,i_o \quad \cdots\cdots(17)$$

式(15)에서 per-unit 界磁電流를 $I = L_{df}\,i_f$ 로 놓으면

$$\psi_d = I - L_d\,i_d \quad \cdots\cdots(18)$$

로 쓸수있다.

定義에 依해서

$$\text{單位値(per-unit)} = \frac{\text{實際値(actual)}}{\text{基準値(base)}}$$

로 表示함으로

$$x_{per} = \frac{x_a}{x_b} = \frac{\omega_a L_a}{\omega_b L_b}$$

로 되고 여기서 ω_a 는 角速度의 實際値이다. 그런데 同期速度에 있어서는 $\omega_a = \omega_b = 377$ radian/sec 인故로 同期速度를 維持하는 限

$$x_{per} = \frac{L_a}{L_b} = \frac{x_a}{x_b}$$

의 關係가 恒常 成立된다. 換言하면 速度가 同期性을 維持하는 限 inductance 値와 reactance 値는 같은 性質의 것임을 알수있어 式(16), (17) 및 (18)은 各各 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\psi_d = I - x_d\,i_d \quad \cdots\cdots(19)$$

$$\psi_q = -x_q\,i_q \quad \cdots\cdots(20)$$

$$\psi_o = -x_o\,i_o \quad \cdots\cdots(22)$$

이 式들을 式(12), (13) 및 (14)에 代入하고 또 同期速度에서는 $p\,\theta = 1$ 이라는 關係를 利用하면

$$e_d = -(p\,x_d + r)i_d + x_q\,i_q + p\,I \quad \cdots\cdots(22)$$

$$e_q = -x_d\,i_d - (p\,x_q + r)i_q + I \quad \cdots\cdots(23)$$

$$e_o = -p\,x_o\,i_o - r\,i_o \quad \cdots\cdots(24)$$

와 如히 凸極型機解析의 基本式이 誘導되는 것이다.

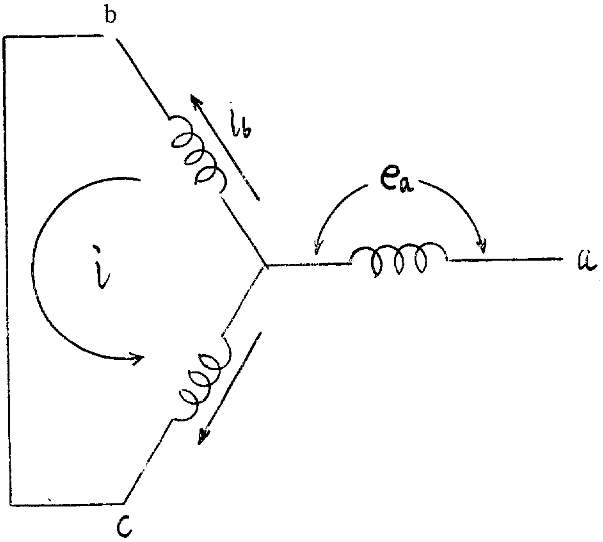

Fig. 1— Line-to-line short circuit.

圖 1과 같이 $b-c$ 相間을 短絡한 경우를 生覺해보겠다. 短絡瞬間에는 다음과 같이

$$i_a = 0$$

$$i_b = -i_c \equiv i$$

의 境界條件이 成立할 것이고 그와 同時에 a 相에는 異常電壓 e_a 가 誘起할 것이다.

여기서 e_a 의 過渡現象을 살펴보면 相間短絡電流 i 에 依해서 發生하는 電機子鎖交磁束은

$$\psi = \psi_b - \psi_c \quad \cdots\cdots(25)$$

로 表示된다. 同期機가 定常運轉을 할때 各相의 鎖交磁束은

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-120) & -\sin(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & -\sin(\theta+120) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \end{bmatrix}$$

임으로 式(25)의 ψ 는

$$\psi = \psi_d\left[\cos(\theta-120) - \cos(\theta-120)\right]$$

$$-\psi_q\left[\sin(\theta-120) - \sin(\theta+120)\right]$$

$$\psi = \sqrt{3}(\psi_d \sin\theta + \psi_q \cos\theta) \quad \cdots\cdots(26)$$

이 된다. 이 式에 式(19), (20)을 代入하면

$$\psi = \sqrt{3}\left[(I - x_d\,i_d)\sin\theta - x_q\,i_q\cos\theta\right]$$

이 되며 또

$$\psi = I - (x_d - x'_d)i_d$$

의 關係式을 上式에 代入함으로써 短絡相間의 鎖交磁束 ψ 를 求할수있는 完全形을 얻게된다.

卽

$$\psi = \sqrt{3}\left[(\Phi - x'_d\,i_d)\sin\theta - x_q\,i_q\cos\theta\right] \quad (27)$$

다음에는 短絡電流의 直軸, 橫軸 및 零軸의 成分을 求해서 式(27)에 代入 함으로써 短絡相의 鎖交磁束 ψ

는 短絡電流 i로서 表現될 것이다. 式(3)에 境界條件 $i_a=0$, $i_b=-i_c\equiv i$를 代入하면

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta-120) & \frac{2}{3}\cos(\theta+120) \\ -\frac{2}{3}\sin\theta & -\frac{2}{3}\sin(\theta-120) & -\frac{2}{3}\sin(\theta+120) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} o \\ i \\ -i \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots (28)$$

과 같은 重要한 式을 얻게 됨으로 $b-c$ 相間을 短絡할 때의 短絡電流의 直軸, 橫軸 및 零軸成分은 곧 式(28)에서

$$i_d = -\frac{2}{\sqrt{3}} i \sin\theta \quad \cdots\cdots (29)$$

$$i_q = -\frac{2}{\sqrt{3}} i \sin\theta \quad \cdots\cdots (30)$$

$$i_0 = 0 \quad \cdots\cdots (31)$$

과 같이 求해진다. 따라서 式(27)에 式(29), (30)을 代入해서 簡單히 整理하면

$$\phi = \sqrt{3}\,\Phi \sin\theta - (x'_d + x_q)\, i - (x_q - x'_d) i \cos 2\theta \quad \cdots\cdots (32)$$

의 關係式을 얻을것이다.

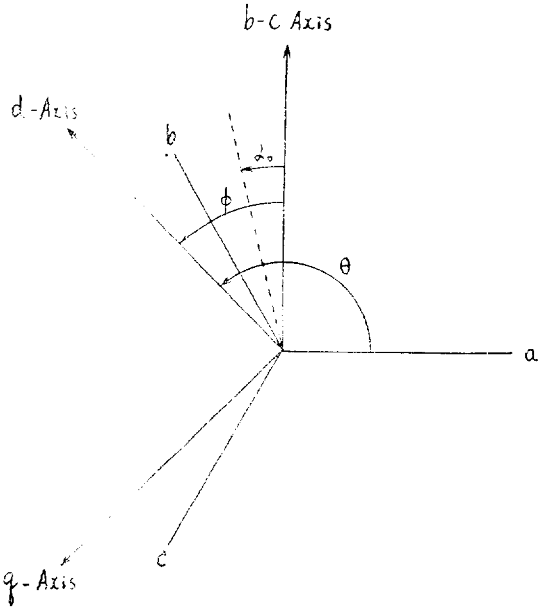

Fig. 2.—Phase-axis relations with respect to short circuit axis(b-c axis).

圖 2와 式(32)에서 明白한바와 같이 短絡前에는 勿論 $i=o$이며 a 相이 基準이 되므로

$$\phi = \sqrt{3}\,\Phi \sin\theta = \sqrt{3}\,\sin[t + (90^\circ + \alpha_o)]$$

卽

$$\phi = \sqrt{3}\,\Phi \cos(t + \alpha_o) \quad \cdots\cdots (33)$$

이 되며 또 一方 短絡後에는 $b-c$ 軸이 基準이 되므로

$$\phi = \sqrt{3}\,\Phi \sin\phi = \sqrt{3}\,\Phi \sin(90^\circ + \alpha_o) \quad \cdots\cdots (34)$$
$$= \sqrt{3}\,\Phi \cos\alpha_o$$

가 成立할 것이다. 그러므로 短絡瞬間을 境界로해서 鎖交磁束의 變化分 式(33)과 (34)를 式(32)에 代入하면

$$\sqrt{3}\,\Phi\cos\alpha_o = \sqrt{3}\,\Phi\cos(t+\alpha_o) - (x_q + x'_d) i + (x_q - x'_d)\, i \cos 2(t+\alpha_o)$$

이 되고 여기서

$$i = \frac{\sqrt{3}\,\Phi[\cos(t+\alpha_o) - \cos\alpha_o]}{(x_q + x'_d) - (x_q - x'_d)\cos 2(t+\alpha_o)} \quad \cdots\cdots (35)$$

$\alpha_o = 0^\circ$인 경우 卽 短絡瞬間을 考慮한다면 上式은

$$i = \frac{\sqrt{3}\,\Phi(\cos t - 1)}{(x_q + x'_d) - (x_q - x'_d)\cos 2t} \quad \cdots\cdots (36)$$

와 如히 相間短絡과 同時에 흘르는 電流가 求해진다. 式(36)을 式(29), (30)에 代入하면 곧 短絡電流의 直軸成分 및 橫軸成分이 求해지는데 그것은 各各 다음과 같다.

卽

$$i_d = \frac{2E\cos t(\cos t - 1)}{\alpha - \beta\cos 2t} \quad \cdots\cdots (37)$$

$$i_q = -\frac{2E\sin t(\cos t - 1)}{\alpha - \beta\cos 2t} \quad \cdots\cdots (38)$$

여기서 $\alpha = x_q + x'_d$, $\beta = x_q - x'_d$로 놓은 것이며

原來 damping을 無視한 경우를 取扱함으로 $\Phi = I = E$의 條件이 成立하고 따라서 Φ 代身에 E로 置換한 것이다.

다음에는 우리가 究明코저하는 open-phase voltage e_a는

$$e_a = e_d\cos\theta - e_q\sin\theta + e_o \quad \cdots\cdots (39)$$

의 關係式에서 求할 수 있음으로 먼저 e_d와 e_q를 求해보는것이 順序라고본다. 式(22), (23)에서 規定해 놓은 e_d 및 e_q에

$$I = E + (x_d - x'_d)\, i_d$$

의 關係를 代入하면

$$e_d = x_q i_q - x'_d\, p\, i_d \quad \cdots\cdots (40)$$

$$e_q = E - x'_d i_d - x_q\, p\, i_q \quad \cdots\cdots (41)$$

와 같이 各各 變更된 結果式을 얻는다.

그런데 式(40)은

$$e_d = -\frac{2x_q E\sin t(\cos t - 1)}{\alpha - \beta\cos 2t} - x'_d\frac{d}{dt}\left[\frac{2E\cos t(\cos t - 1)}{\alpha - \beta\cos 2t}\right]$$

이며

$$e_d = -\frac{2x_q E\sin t(\cos t - 1)}{\alpha - \beta\cos 2t}$$

$$-\frac{x'_d E}{(\alpha-\beta\cos 2t)^2}\Big[\beta\sin 3t-2(\alpha+\beta)\sin 2t+(2\alpha+3\beta)\sin t)\Big]\cdots\cdots(42)$$

로 計算이 되며 또 式(41)의 e_q 는

$$e_q=E-\frac{2x'_d E\cos t(\cos t-1)}{\alpha-\beta\cos 2t}-\frac{x_q E}{(\alpha-\beta\cos 2t)^2}\Big[-\beta\cos 4t+3\beta\cos 2t-2\alpha\cos 2t+(2\alpha-5\beta)\cos t+3\beta\Big]\cdots\cdots(43)$$

와 같이 計算이 된다.

여기서 얻은 e_d, e_q 를 式(39)에 代入한다면 非短絡相에 나타나는 異常電壓 e_a 를 求할 수 있다. 圖2의 vector diagram 과 式(24)를 參酌하면 式(39)를 다음과 같이 變更할 수 있다.

卽

$$e_a=-e_d\sin(t+\alpha_o)-e_q\cos(t+\alpha_o)+p(-x_o i_o)-r\,i_o$$

여기서 短絡瞬間에는 $\alpha_o=0$, $i_o=0$ 인 故로

$$e_a=-e_d\sin t-e_q\cos t\cdots\cdots(44)$$

이것이 非短絡相의 端子電壓을 求하는 最終式이되며 따라서 위에서 얻은 式(42),(43)의 e_d 와 e_q 를 式(44)에 代入하여 算出하면 所期의 目的을 達하게된다.

그러므로

$$e_a=\frac{x_q E\sin t\,(\sin 2t-2\sin t)}{\alpha-\beta\cos 2t}+\frac{x'_d E\sin t}{(\alpha-\beta\cos 2t)^2}\Big[\beta\sin 3t-2(\alpha+\beta)\sin 2t-(2\alpha+3\beta)\sin t-E\cos t+\frac{x_d E\cos t(\cos 2t-2\cos t+1)}{\alpha-\beta\cos 2t}+\frac{x_q E\cos t}{(\alpha-\beta\cos 2t)^2}\Big[-\beta\, 4t+3\beta\cos 3t-2\alpha\cos 2t+(2\alpha-5\beta)\cos t+3\beta\Big]$$

上式을 簡單히 整理하면

$$e_a=-E\cos t+\frac{E}{\alpha-\beta\cos 2t}\Big[-\frac{1}{2}(x_q-x'_d)\cos 3t+(x_q-x'_d)\cos 2t+\frac{1}{2}(x_q+3x'_d)\cos t-(x_q+x'_d)\Big]+\frac{E}{(\alpha-\beta\cos 2t)^2}\Big\{-\frac{x_q\beta}{2}\cos 5t-\frac{\beta}{2}(x'_d-3x_q)\cos 4t-\Big[\alpha(x_q-x'_d)+\frac{\beta}{2}(x_q-2x'_d)\Big]\cos 3t-\Big[\alpha(x_q-x'_d)-\beta(x_q+x'_d)\Big]\cos 2t-\Big[\alpha(x_q+x'_d)-\beta(3x_q-x'_d)\Big]\cos t+\Big[\alpha(x_q+x'_d)-\frac{\beta}{2}(5x_q-3x'_d)\Big]\Big\}$$

와 같이 되고 또는

$$e_a=-E\cos t+\frac{E}{\alpha-\beta\cos 2t}\Big[-\frac{\beta}{2}\cos 3t+\beta\cos 2t+\frac{1}{2}(\alpha+2x'_d)\cos t-\alpha\Big]+\frac{E}{(\alpha-\beta\cos 2t)^2}\Big\{-\frac{x_q\beta}{2}\cos 5t+\frac{\beta}{2}(2x_q+\beta)\cos 4t-\beta\Big[\alpha+\frac{\beta-x'_d}{2}\Big]\cos 3t-\Big[\alpha^2-\beta(\beta+2x_q)\Big]\cos t+\Big[\alpha^2-\beta x_q+3\beta)\Big]\Big\}\cdots\cdots(45)$$

로 된다. 여기서 $\alpha=x_q+x'_d$, $\beta=x_q-x'_d$ 이다. 우리는 同期機定數를 $x_d=0.78$, $x'_d=0.21$, $x_q=0.48$ 및 $E=1$ 로 定했음으로 이것들을 式(45)에 代入해서 1st. cycle 分을 그려보기 爲하여 아래와 같이 計算한다.

$$e_a=-\cos t+\frac{1}{0.69-0.27\cos 2t}\Big(-0.135\cos 3t+0.27\cos 2t+0.56\cos t-0.69\Big)+\frac{1}{(0.69-0.27\cos 2t)^2}\Big(-0.065\cos 5t+0.166\cos 4t-0.194\cos 3t-0.144\cos t+0.237\Big)\cdots\cdots(46)$$

式(46)을 圖示하고저 t 의 函數로서 e_a 의 값을 求한 結果 아래와 같은 表1을 얻게되며 그것의 1st. cycle 分을 plot하면 圖3과 같다.

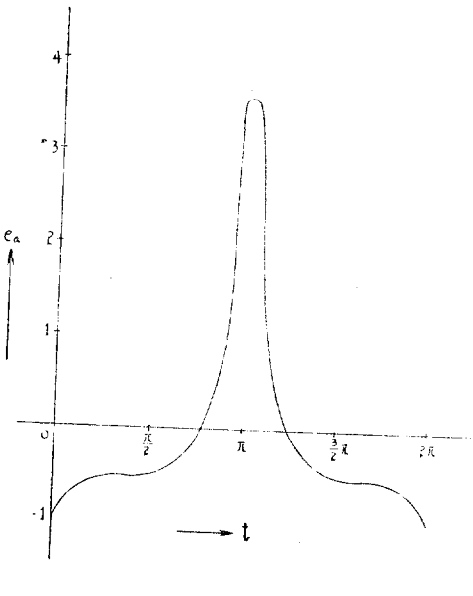

Fig. 3— Wave form of open-phase voltage for a line-to-line short circuit from no-load.

表 1. Data from equation (46)

t	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$	π	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{7\pi}{4}$	2π
e_a	-1	-0.52	-0.56	-0.105	-3.58	-0.105	-0.56	-0.52	-1

結 論

以上으로써 2相間短絡時에 非短絡相의 端子電壓에 어떤 變化를 齊來한것인가를 理論的으로 究明하였다. 一般的으로 制動捲線이 無한 同期機가 制動捲線이 有한 同期機보다 open-phase voltage가 훨씬 큰 値를 갖는다는 點에서 本論의 意義가 있다고 보겠다. 獨自的方法으로 式(45)를 誘導해 낸데 對한 滿足을 느끼나 讀者諸賢의 아낌없는 批判을 바란다.

參考文獻

1. Westinghouse Central Station Engineers, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book," Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, Pennsilvania; 1950, pp. 177—179.

(1963年 11月 27日 接受)