北見工業大学研究報告　Memoirs of the Kitami Institute of Technology
第16巻 第2号 (昭和60年)　Vol. 16 No. 2 (1985)

交流励磁型同期機の不平衡突発短絡に関する解析 (第2報)*

——一線地絡故障——

田村淳二**
村田年昭**
武田郁夫**
長谷川淳***
藤原一***

(昭和59年9月18日受理)

Analysis of the Unsymmetrical Sudden Short-Circuit of an AC Excited Synchronous Machine (Part 2)

—One Line-to-Ground Fault—

by Junji TAMURA, Toshiaki MURATA, Ikuo TAKEDA, Jun HASEGAWA and Hajime FUJIWARA

The line-to-line fault of AESM was analyzed in the preceding paper. In this paper, analysis of the one line-to-ground fault is presented. As we intend to use the AESM as a driving motor-generator in the flywheel energy storage system, it is necessary to analyze the above single-phase asymmetrical faults (line-to-line and one line-to-ground).

First, after brief discussion of the line-to-line fault, the basic differential equations for the one line-to-ground fault of a secondary winding are derived. Next the solutions for that fault are derived from the solutions for the line-to-line fault of a secondary winding by transformation of circuit constants and variables. Furthermore the fault of a primary winding is also analyzed and the solutions are derived from those for the line-to-line fault by the same transformation. Finally the short-circuit torques for the line-to-line fault and one line-to-ground fault are discussed.

1. まえがき

筆者らは，1次側固定子および2次側円筒型回転子の両方にそれぞれ対称三相巻線を有し，制動巻線のない構造の回転機を交流励磁型同期機 (AC excited Synchronous Machine, 以下AESMと略記する) と呼び，電力系統用フライホイール電力貯蔵装置における駆動用回転機へ

---

* 電気学会回転機研究会 (昭和58年9月) にて一部発表

** 北見工業大学電気工学科
*** 北海道大学工学部電気工学科

の応用を目的としてその理論解析を進めてきた[1~3]。これらの巻線に対して，1次側には固定周波数の，2次側には任意のすべり周波数の対称三相交流をそれぞれ加えて，これらの両励磁周波数によって決まる回転数で同期運転する方式をとるので，巻線型誘導機の二次励磁方式に構造的には酷似しているが，2次側励磁周波数を固定して同期機として運転する点が大きく異なっている。この種の回転機に関する研究は筆者らの他にも種々報告されており（たとえば文献(4)～(13)など），可変速駆動回転機の一方式として最近特に注目されているものである。

前稿[14]において筆者らは，AESM の不平衡突発短絡現象のうちの線間短絡故障について解析を行なったが，本稿ではひきつづき一線地絡故障に関して解析する。これらのいわゆる単相不平衡故障は，各種の短絡故障の中でも特にその発生確率が高いので，解析，検討を行なうことは非常に重要であると考えられる。以下においては，まず初めに線間短絡故障の基礎的な理論について簡単に述べた後，2次側一線地絡時の解析を行なう。次に，1次側一線地絡故障に関して検討し，最後に線間短絡故障および一線地絡故障のそれぞれの場合における短絡トルクについて解析を行なう。

2.　線間短絡故障に関する基礎的理論[14]

本章では，以後の解析において必要となる二軸理論に関する基礎的事項，ならびに前稿[14]において得られた線間短絡故障に関する解析結果について簡単に説明する。

一定角速度 ω_{mn} で回転している AESM の d, q 軸（d 軸は2次側 a 相軸に，q 軸はそれより相順方向に 90° 進んだ位置にそれぞれ固定）回路上における基礎微分方程式は次式で表わされる。なお，各記号の意味については前稿を参照して戴きたい。

$$\left.\begin{aligned} v_{1d} &= (r_{1a}+pL_1)\,i_{1d}+pL_m\,i'_{2d}-e_{vd} \\ v_{1q} &= (r_{1a}+pL_1)\,i_{1q}+pL_m\,i'_{2q}-e_{vq} \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned} v'_{2d} &= (r'_{2a}+pL_2)\,i'_{2d}+pL_m\,i_{1d} \\ v'_{2q} &= (r'_{2a}+pL_2)\,i'_{2q}+pL_m\,i_{1q} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

各速度起電力は，

$$\left.\begin{aligned} e_{vd} &= \omega_{mn}\,\lambda_{1q} \\ e_{vq} &= -\omega_{mn}\,\lambda_{1d} \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

$$\left.\begin{aligned} \lambda_{1d} &= i_{1d}\,L_1+i'_{2d}\,L_m \\ \lambda_{1q} &= i_{1q}\,L_1+i'_{2q}\,L_m \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

となり，これらにより発生トルク τ_M が次式で表わされる[2]

$$\begin{aligned} \tau_M &= -(e_{vd}\,i_{1d}+e_{vq}\,i_{1q})/\omega_{mn} \\ &= L_m(i_{1q}\,i'_{2d}-i_{1d}\,i'_{2q}) \end{aligned} \quad (5)$$

また，零相分に関しては次式が成立する。

$$\left.\begin{aligned} v_{10} &= (r_{1a}+pl_{10})\,i_{10} \\ v'_{20} &= (r'_{2a}+pl'_{20})\,i'_{20} \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

AESM の1次側および2次側の各電圧，電流は，次式により等価 d, q 軸成分に変換される。

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3}\,v_{10} & \sqrt{3}\,i_{10} \\ v_{1d} & i_{1d} \\ v_{1q} & i_{1q} \end{bmatrix} = [C_\theta] \begin{bmatrix} v_{1a} & i_{1a} \\ v_{1b} & i_{1b} \\ v_{1c} & i_{1c} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3}\,v'_{20} & \sqrt{3}\,i'_{20} \\ v'_{2d} & i'_{2d} \\ v'_{2q} & i'_{2q} \end{bmatrix} = [C_\theta(\theta=0)] \begin{bmatrix} v'_{2a} & i'_{2a} \\ v'_{2b} & i'_{2b} \\ v'_{2c} & i'_{2c} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$[C_\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta-4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-2\pi/3) & -\sin(\theta-4\pi/3) \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\theta = \omega_{mn}\,t+\theta_0 \tag{10}$$

なお本研究では，AESM の1次側または2次側の各端子電圧として，次式のような三相対称電圧を仮定している。ただし，b, c 相は位相がそれぞれ $2\pi/3$, $4\pi/3$ ずつ遅れているとする。

$$v_{1a} = \sqrt{2}\,V_{1a}\cos(\omega_1 t+\rho_1) \tag{11}$$

$$v'_{2a} = \sqrt{2}\,V'_{2a}\cos(\omega_2 t+\rho_2) \tag{12}$$

次に，一定角速度 ω_{mn} で回転し，1次側には(11)式の三相対称電圧が印加され，2次側が開放している状態で2b相と2c相が短絡した2次側線間短絡時の基礎微分方程式は次式で表わされる。なお，添字 $LL2$ は2次側線間短絡の変数であることを表わしている。

$$p\boldsymbol{X}_{LL2} = [A_{LL2}]\,\boldsymbol{X}_{LL2}+[B_{LL2}]\,\boldsymbol{U}_{LL2} \tag{13}$$

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{X}_{LL2} &= [i_{1d}^{LL2} \quad i_{1q}^{LL2} \quad \sqrt{2}\,i_{2b}^{LL2}]^T \\ \boldsymbol{U}_{LL2} &= [v_{1d} \quad v_{1q}]^T \\ [A_{LL2}] &= \begin{pmatrix} -\dfrac{r_{1a}}{L_1} & \omega_{mn} & \dfrac{\omega_{mn}L_m}{L_1} \\ -\dfrac{\omega_{mn}L_1L_2}{L_0^2} & -\dfrac{r_{1a}L_2}{L_0^2} & -\dfrac{r'_{2a}L_m}{L_0^2} \\ -\dfrac{\omega_{mn}L_1L_m}{L_0^2} & -\dfrac{r_{1a}L_m}{L_0^2} & -\dfrac{r'_{2a}L_1}{L_0^2} \end{pmatrix} \\ [B_{LL2}] &= \begin{pmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & L_2/L_0^2 \\ 0 & -L_m/L_0^2 \end{pmatrix} \\ L_0^2 &= L_1L_2-L_m^2 \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

上式における各印加電圧および各初期条件は次式となる。

$$\left.\begin{aligned} v_{1d} &= \sqrt{3}\,V_{1a}\cos\{(\omega_1-\omega_{mn})\,t+\rho_1-\theta_0\} \\ v_{1q} &= \sqrt{3}\,V_{1a}\sin\{(\omega_1-\omega_{mn})\,t+\rho_1-\theta_0\} \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

$$\left.\begin{aligned}
&\sqrt{2}\ i'^{LL2}_{2b0} = 0\\
&i^{LL2}_{1d0} = \frac{\sqrt{3}\ V_{1a}}{\sqrt{r_{1a}^2+(\omega_1 L_1)^2}}\cdot\cos(\rho_1-\theta_0-\alpha_1)\\
&i^{LL2}_{1q0} = \frac{\sqrt{3}\ V_{1a}}{\sqrt{r_{1a}^2+(\omega_1 L_1)^2}}\cdot\sin(\rho_1-\theta_0-\alpha_1)\\
&\alpha_1 = \underline{/\ r_{1a}+j\omega_1 L_1}
\end{aligned}\right\}\quad(16)$$

また，1次側線間短絡時の各電流解は，上述した2次側線間短絡時の解に次式で表わされる変換（記号［　］$_{2\to1}$で表わす）を行なうことにより直接得ることができる。

$$\left.\begin{aligned}
&\omega_{mn} \longrightarrow -\omega_{mn}, \quad \omega_1 \longrightarrow \omega_2\,(=\omega_1-\omega_{mn})\\
&\theta_0 \longrightarrow -\theta_0, \quad V_{1a} \longrightarrow V'_{2a}\\
&r_{1a} \longleftrightarrow r'_{2a}, \quad L_1 \longleftrightarrow L_2, \quad l_{10} \longleftrightarrow l'_{20}\\
&\alpha_1 \longrightarrow \alpha_2, \quad \rho_1 \longrightarrow \rho_2\\
&(L_0^2,\ L_m\ \text{はそのまま})
\end{aligned}\right\}\quad(17)$$

3.　2次側一線地絡故障に関する解析

3.1　基礎微分方程式の導出

一定角速度 ω_{mn} で回転し，1次側には(11)式の三相対称電圧が印加され，2次側が開放している状態で2次側a相と2次側中性点が短絡した場合について解析する。条件は，

$$v'_{2a} = 0 \tag{18}$$

$$i'_{2b} = i'_{2c} = 0 \tag{19}$$

であり，上式と(8)式より

$$\begin{bmatrix}\sqrt{3}\ i'_{20}\\ i'_{2d}\\ i'_{2q}\end{bmatrix} = [C_\theta(\theta=0)]\begin{bmatrix}i'_{2a}\\ 0\\ 0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}i'_{2a}/\sqrt{3}\\ \sqrt{2/3}\cdot i'_{2a}\\ 0\end{bmatrix} \tag{20}$$

となる。よって，2次側零相および d, q 軸の各磁束鎖交数は次式として表わされる。

$$\left.\begin{aligned}
&\sqrt{3}\ \lambda_{20} = \sqrt{3}\ i'_{20}\,l'_{20} = l'_{20}\,i'_{20}/\sqrt{3}\\
&\lambda_{2d} = L_2\,i'_{2d}+L_m\,i_{1d} = L_2\sqrt{2/3}\cdot i'_{2a}+L_m\,i_{1d}\\
&\lambda_{2q} = L_2\,i'_{2q}+L_m\,i_{1q} = L_m\,i_{1q}
\end{aligned}\right\}\quad(21)$$

一方，2次側a相の磁束鎖交数 λ_{2a} は(8)式と同様な式の逆変換を行なうことにより，

$$\lambda_{2a} = \sqrt{2/3}\ \{(1/\sqrt{2})\sqrt{3}\ \lambda_{20}+\lambda_{2d}\} \tag{22}$$

と表わされる。上式に(21)式を代入すると，

$$\lambda_{2a} = (1/3)(l'_{20}+2L_2)\,i'_{2a}+\sqrt{2/3}\cdot L_m\,i_{1d} \tag{23}$$

となり，したがって(18)式より，

$$
\begin{aligned}
v'_{2a} &= r'_{2a}\, i'_{2a} + p\,\lambda_{2a} \\
&= r'_{2a}\, i'_{2a} + p\,\{(1/3)\,(l'_{20}+2L_2)\, i'_{2a} + \sqrt{2/3}\cdot L_m\, i_{1d}\} = 0
\end{aligned}
\tag{24}
$$

が得られる。一方，(20) 式を (1) 式に代入して，

$$
\left.
\begin{aligned}
v_{1d} &= (r_{1a}+pL_1)\, i_{1d} + pL_m\sqrt{2/3}\cdot i'_{2a} - \omega_{mn}\, L_1\, i_{1q} \\
v_{1q} &= (r_{1a}+pL_1)\, i_{1q} + \omega_{mn}\, L_1\, i_{1d} + \omega_{mn}\, L_m\sqrt{2/3}\cdot i'_{2a}
\end{aligned}
\right\}
\tag{25}
$$

が得られる。以上，(24), (25) 式が 2 次側一線地絡時の基礎微分方程式となり，(15), (16) 式および

$$
i'_{2a0} = 0 \tag{26}
$$

の条件のもとで解くことになる。

3.2　基礎微分方程式の解析

(24), (25) 式の基礎微分方程式を変形すると以下のようになる。なお，この場合も各変数に 2 次側一線地絡の添字 (1G2) を付してある。

$$
p\boldsymbol{X}_{1G2} = [A_{1G2}]\,\boldsymbol{X}_{1G2} + [B_{1G2}]\,\boldsymbol{U}_{1G2} \tag{27}
$$

ただし，

$$
\left.
\begin{aligned}
&\boldsymbol{X}_{1G2} = [i_{1d}^{1G2} \quad i_{1q}^{1G2} \quad \sqrt{2/3}\cdot i_{2a}^{\prime 1G2}]^T \\
&\boldsymbol{U}_{1G2} = [v_{1d} \quad v_{1q}]^T \\
&[A_{1G2}] = \begin{bmatrix}
-\dfrac{L_{2G}r_{1a}}{L_{0G}^2} & \dfrac{\omega_{mn}L_1L_{2G}}{L_{0G}^2} & \dfrac{L_m}{L_{0G}^2}\dfrac{3}{2}\,r'_{2a} \\
-\omega_{mn} & -\dfrac{r_{1a}}{L_1} & -\dfrac{\omega_{mn}L_m}{L_1} \\
\dfrac{L_m r_{1a}}{L_{0G}^2} & -\dfrac{\omega_{mn}L_1L_m}{L_{0G}^2} & -\dfrac{L_1}{L_{0G}^2}\dfrac{3}{2}\,r'_{2a}
\end{bmatrix} \\
&[B_{1G2}] = \begin{bmatrix}
L_{2G}/L_{0G}^2 & 0 \\
0 & 1/L_1 \\
-L_m/L_{0G}^2 & 0
\end{bmatrix} \\
&L_{2G} = (l'_{20}+2L_2)/2 \\
&L_{0G}^2 = L_1L_{2G} - L_m^2 = (L_1 l'_{20} + 2L_0^2)/2
\end{aligned}
\right\}
\tag{28}
$$

である。上式において，

$$
X_{1G2} = [T_{1G}]^{-1}\cdot X_{1GT} \tag{29}
$$

$$
[T_{1G}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{30}
$$

なる変数変換を行なうと，

$$p\boldsymbol{X}_{1GT} = [T_{1G}]\,[A_{1G2}]\,[T_{1G}]^{-1}\cdot\boldsymbol{X}_{1GT}+[T_{1G}]\,[B_{1G2}]\,\boldsymbol{U}_{1G2}$$

$$=\begin{bmatrix} -\dfrac{r_{1a}}{L_1} & \omega_{mn} & \dfrac{\omega_{mn}L_m}{L_1} \\ -\dfrac{\omega_{mn}L_1L_{2G}}{L_{0G}^2} & -\dfrac{L_{2G}r_{1a}}{L_{0G}^2} & \dfrac{L_m}{L_{0G}^2}\dfrac{3}{2}r'_{2a} \\ \dfrac{\omega_{mn}L_1L_m}{L_{0G}^2} & \dfrac{L_mL_{1a}}{L_{0G}^2} & -\dfrac{L_1}{L_{0G}^2}\dfrac{3}{2}r'_{2a} \end{bmatrix}\boldsymbol{X}_{1GT}$$

$$+\begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & L_2/L_{0G}^2 \\ 0 & -L_m/L_{0G}^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -v_{1q} \\ v_{1d} \end{bmatrix} \tag{31}$$

となるが，上式は2次側線間短絡時の基礎方程式(13)〜(15)式において，

$$\left.\begin{array}{ll} L_0^2 \longrightarrow L_{0G}^2\,, & L_2 \longrightarrow L_{2G} \\ r'_{2a} \longrightarrow (3/2)\,r'_{2a}\,, & \theta_0 \longrightarrow \theta_0-\pi/2 \end{array}\right\} \tag{32}$$

なる変換を行なったものに完全に一致する。また，初期条件に関しても(26)，(28)〜(30)式および(16)式より，

$$\boldsymbol{X}_{1GT}(t=0) = [T_{1G}]\,\boldsymbol{X}_{1G2}(t=0)$$

$$=\begin{bmatrix} -i_{1q0}^{1G2} \\ i_{1d0}^{1G2} \\ \sqrt{\dfrac{2}{3}}\cdot i_{2a0}^{\prime 1G2} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \dfrac{-\sqrt{3}\;V_{1a}}{\sqrt{r_{1a}^2+(\omega_1L_1)^2}}\sin(\rho_1-\theta_0-\alpha_1) \\ \dfrac{\sqrt{3}\;V_{1a}}{\sqrt{r_{1a}^2+(\omega_1L_1)^2}}\cos(\rho_1-\theta_0-\alpha_1) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{33}$$

となり，$\boldsymbol{X}_{LL2}(t=0)$に(32)式の変換を行なったものに完全に一致する。以上のことから(32)式の変換を$[\quad]_{L\to G}$と表わすことにすると，(31)式の解は

$$\boldsymbol{X}_{1GT} = [\boldsymbol{X}_{LL2}]_{L\to G} \tag{34}$$

として求まり，最終的に(27)式の解は(29)式より，

$$\boldsymbol{X}_{1G2} = [T_{1G}]^{-1}\cdot[\boldsymbol{X}_{LL2}]_{L\to G} \tag{35}$$

として得られることになる。このように，2次側一線地絡時の解は2次側線間短絡時の解より直接得ることができる。前式を成分ごとに書くと，

$$\left.\begin{array}{l} i_{1d}^{1G2} = [i_{1q}^{LL2}]_{L\to G} \\ i_{1q}^{1G2} = [-i_{1d}^{LL2}]_{L\to G} \\ \sqrt{2/3}\;i_{2a}^{\prime 1G2} = [\sqrt{2}\;i_{2b}^{\prime LL2}]_{L\to G} \end{array}\right\} \tag{36}$$

となる。これより，2次側一線地絡時の1次側a相電流i_{1a}^{1G2}は，(7)式の逆変換式より

$$\begin{aligned} i_{1a}^{1G2} &= \sqrt{2/3}\,\{i_{1d}^{1G2}\cos(\omega_{mn}t+\theta_0)-i_{1q}^{1G2}\sin(\omega_{mn}t+\theta_0)\} \\ &= [\sqrt{2/3}\,\{i_{1d}^{LL2}\cos(\omega_{mn}t+\theta_0)-i_{1q}^{LL2}\sin(\omega_{mn}t+\theta_0)\}]_{L\to G} \\ &= [i_{1a}^{LL2}]_{L\to G} \end{aligned} \tag{37}$$

となり，これも2次側線間短絡時の解より直接得られることが解る。また零相分電流 $i_{20}'^{1G2}$ は，(36) 式の $i_{2a}'^{1G2}$ を (20) 式に代入することにより得られ，

$$i_{20}'^{1G2} = (1/3)\, i_{2a}'^{1G2} \tag{38}$$

となる。

4. 1次側一線地絡故障に関する解析

一定角速度 ω_{mn} で回転し，2次側には (12) 式で表わされる三相対称電圧が印加され，1次側が開放している状態で1次側 a 相と1次側中性点が短絡した場合について解析する。この場合も前稿における1次側線間短絡時の解析と同様に，1次側回路に固定した D, Q 軸座標系（1 a 相巻線軸に D 軸，それより 90° 相順方向に進んだ位置に Q 軸をそれぞれ固定する）により取り扱う。解析過程は前章の場合とまったく同様（変換行列 $[C_\theta]$ の回転角 θ は $-\theta$ となる）であり，基礎微分方程式は最終的に次式となる。

$$\left.\begin{aligned}
&r_{1a}\, i_{1a} + p\,\{(1/3)\,(l_{10}+2L_1)\, i_{1a} + \sqrt{2/3}\cdot L_m\, i_{2D}'\} = 0\\
&v_{2D}' = (r_{2a}'+pL_2)\, i_{2D}' + pL_m\sqrt{2/3}\cdot i_{1a} + \omega_{mn}\, L_2\, i_{2Q}'\\
&v_{2Q}' = (r_{2a}'+pL_2)\, i_{2Q}' - \omega_{mn}\, L_m\sqrt{2/3}\cdot i_{1a} - \omega_{mn}\, L_2\, i_{2D}'
\end{aligned}\right\} \tag{39}$$

ただし，

$$\left.\begin{aligned}
&v_{2D}' = \sqrt{3}\ V_{2a}'\cos\{(\omega_2+\omega_{mn})\,t+\rho_2+\theta_0\}\\
&v_{2Q}' = \sqrt{3}\ V_{2a}'\sin\{(\omega_2+\omega_{mn})\,t+\rho_2+\theta_0\}\\
&i_{2D0}' = \frac{\sqrt{3}\ V_{2a}'}{\sqrt{r_{2a}'^2+(\omega_2 L_2)^2}}\cdot\cos(\rho_2+\theta_0-\alpha_2)\\
&i_{2Q0}' = \frac{\sqrt{3}\ V_{2a}'}{\sqrt{r_{2a}'^2+(\omega_2 L_2)^2}}\cdot\sin(\rho_2+\theta_0-\alpha_2)\\
&i_{1a0} = 0\\
&\alpha_2 = \underline{/\, r_{2a}'+j\omega_2 L_2}
\end{aligned}\right\} \tag{40}$$

である。以上で得られた式は (24)～(26), (15), (16) 式の2次側一線地絡時の方程式に (17) 式の変換を行なったものと，i_{1a} と i_{2a}', i_{2D}' と i_{1d}, i_{2Q}' と i_{1q} の対応のもとで完全に一致する。よって，前稿における1次側線間短絡の解析の場合とまったく同様にして，1次側一線地絡時の解（添字 1 G 1 を付す）は2次側一線地絡時の解より，

$$\left.\begin{aligned}
&\sqrt{2/3}\cdot i_{1a}^{1G1} = [\sqrt{2/3}\cdot i_{2a}'^{1G2}]_{2\to1}\\
&i_{2D}'^{1G1} = [i_{1d}^{1G2}]_{2\to1}\\
&i_{2Q}'^{1G1} = [i_{1q}^{1G2}]_{2\to1}
\end{aligned}\right\} \tag{41}$$

として求まり，さらに (36) 式を代入して

$$\left.\begin{aligned}
&\sqrt{2/3}\cdot i_{1a}^{1G1} = [[\sqrt{2}\ i_{2b}'^{LL2}]_{L\to G}]_{2\to1}\\
&i_{2D}'^{1G1} = [[i_{1q}^{LL2}]_{L\to G}]_{2\to1}\\
&i_{2Q}'^{1G1} = [[-i_{1d}^{LL2}]_{L\to G}]_{2\to1}
\end{aligned}\right\} \tag{42}$$

と表わされることとなる。上式より2次側a相分電流 $i_{2a}^{\prime 1G1}$ は，(37)式より

$$\begin{aligned} i_{2a}^{\prime 1G1} &= \sqrt{2/3}\ \{i_{2D}^{\prime 1G1}\cos(-\omega_{mn}t-\theta_0)-i_{2Q}^{\prime 1G1}\sin(-\omega_{mn}t-\theta_0)\} \\ &= [\sqrt{2/3}\ \{i_{1d}^{1G2}\cos(\omega_{mn}t+\theta_0)-i_{1q}^{1G2}\sin(\omega_{mn}t+\theta_0)\}]_{2\to 1} \\ &= [i_{1a}^{1G2}]_{2\to 1} \\ &= [[i_{1a}^{LL2}]_{L\to G}]_{2\to 1} \end{aligned} \tag{43}$$

として求まる。また，1次側零相分電流 i_{10}^{1G1} は(38)式の場合とまったく同様に，

$$i_{10}^{1G1} = (1/3)\, i_{1a}^{1G1} \tag{44}$$

となる。

以上のように，1次側一線地絡時の解も2次側一線地絡時の解より，しいては2次側線間短絡時の解より直接導出できることとなる。

5.　不平衡突発短絡トルクの計算

5.1　線間短絡時のトルク

本章では，前稿ならびに本稿において解析を行なった1次側および2次側の線間短絡ならびに一線地絡の4つの故障時におけるトルクの式をそれぞれ導出する。

トルク τ_M は(5)式にて表わされる。2次側線間短絡時においては

$$\left.\begin{aligned} i_{2d}^{\prime LL2} &= 0 \\ i_{2q}^{\prime LL2} &= \sqrt{2}\ i_{2b}^{\prime LL2} \end{aligned}\right\} \tag{45}$$

なる関係があるので(前稿参照)，これを(5)式に代入すると2次側線間短絡時の発生トルク τ_M^{LL2} は次式で表わされる。

$$\tau_M^{LL2} = -L_m\, i_{1d}^{LL2}\cdot\sqrt{2}\ i_{2b}^{\prime LL2} \tag{46}$$

上式に前稿にて導出した i_{1d}^{LL2}, $\sqrt{2}\ i_{2b}^{\prime LL2}$ の式を代入することにより実際のトルク式が求まる。

次に，1次側線間短絡時のトルク τ_M^{LL1} は，(5)式の場合と同様にして，

$$\tau_M^{LL1} = L_m\,(i_{1Q}^{LL1}\, i_{2D}^{\prime LL1} - i_{1D}^{LL1}\, i_{2Q}^{\prime LL1}) \tag{47}$$

と表わされる。ところがこの場合にも(45)式と同様に，

$$\left.\begin{aligned} i_{1D}^{LL1} &= 0 \\ i_{1Q}^{LL1} &= \sqrt{2}\ i_{1b}^{LL1} \end{aligned}\right\} \tag{48}$$

の関係があり，また

$$\left.\begin{aligned} i_{1b}^{LL1} &= [i_{2b}^{\prime LL2}]_{2\to 1} \\ i_{2D}^{\prime LL1} &= [i_{1d}^{LL2}]_{2\to 1} \end{aligned}\right\} \tag{49}$$

と表わされるので(前稿参照)，以上(48)，(49)式を(47)式に代入すると(46)式より，

$$\begin{aligned}\tau_M^{LL1} &= L_m\sqrt{2}\ i_{1b}^{LL1}\ i_{2D}'^{LL1}\\ &= L_m\,[\sqrt{2}\ i_{2b}'^{LL2}]_{2\to1}\cdot[i_{1d}^{LL2}]_{2\to1}\\ &= -[-L_m\sqrt{2}\ i_{2b}'^{LL2}\ i_{1d}^{LL2}]_{2\to1}\\ &= -[\tau_M^{LL2}]_{2\to1}\end{aligned}\tag{50}$$

となる。よって1次側線間短絡時のトルク τ_M^{LL1} は電流解の場合と同様に，2次側線間短絡時のトルク τ_M^{LL2} に(17)式の変換を行なうことにより直接得られることとなる。

5.2　一線地絡時のトルク

2次側一線地絡時のトルク τ_M^{1G2} は，(5)，(20)式より，

$$\tau_M^{1G2} = L_m\, i_q^{1G2}\cdot\sqrt{2/3}\cdot i_{2a}^{1G2}\tag{51}$$

と表わされる。上式に(36)式を代入すると(46)式より，

$$\begin{aligned}\tau_M^{1G2} &= L_m\,[-i_{1d}^{LL2}[_{L\to G}\cdot[\sqrt{2}\ i_{2b}'^{LL2}]_{L\to G}\\ &= [-L_m\, i_{1d}^{LL2}\cdot\sqrt{2}\ i_{2b}'^{LL2}]_{L\to G}\\ &= [\tau_M^{LL2}]_{L\to G}\end{aligned}\tag{52}$$

となり，これも2次側線間短絡時のトルクに(32)式の変換を行なうことにより直接得られることとなる。

次に，1次側一線地絡時のトルク τ_M^{1G1} は(47)式と同様に，

$$\tau_M^{1G1} = L_m\,(i_{1Q}^{1G1}\ i_{2D}'^{1G1} - i_{1D}^{1G1}\ i_{2Q}'^{1G1})\tag{53}$$

と表わされるが，この場合にも(20)式と同様に，

$$\left.\begin{aligned} i_{1D}^{1G1} &= \sqrt{2/3}\cdot i_{1a}^{1G1}\\ i_{1Q}^{1G1} &= 0\end{aligned}\right\}\tag{54}$$

なる関係があるので，これと(41)式を(53)式に代入すると(51)，(52)式より

$$\begin{aligned}\tau_M^{1G1} &= -L_m\sqrt{2/3}\ i_{1a}^{1G1}\cdot i_{2Q}'^{1G1}\\ &= -L_m\,[\sqrt{2/3}\ i_{2a}'^{1G2}]_{2\to1}\cdot[i_q^{1G2}]_{2\to1}\\ &= -[L_m\sqrt{2/3}\ i_{2a}'^{1G2}\cdot i_q^{1G2}]_{2\to1}\\ &= -[\tau_M^{1G2}]_{2\to1}\\ &= -[[\tau_M^{LL2}]_{L\to G}]_{2\to1}\end{aligned}\tag{55}$$

が得られ，この場合も2次側線間短絡時の解より直接得られることが解る。

以上のように，トルクに関しても2次側線間短絡時のトルク τ_M^{LL2} から他の三つの故障時のトルクは，すべて直接得られることとなる。

6.　あとがき

本稿では，前稿にひきつづき AESM の無負荷不平衡突発短絡のうち，一線地絡故障およびトルクに関して解析した。まず初めに，前稿において得られた線間短絡故障に関する解析結果について簡単に説明した後，2次側一線地絡故障について解析を行なった。この場合の基礎微

分方程式も線間短絡の場合と同様三元連立微分方程式となるが，この方程式が線間短絡時の基礎微分方程式に簡単な回路定数の変換および変数変換を行なったものに完全に一致することを示した。したがって，その解も線間短絡時の解に同様な変換を行なうことにより微分方程式を解くことなく直接導出できることが解った。次に，1次側一線地絡故障に関して解析を行なったが，この解も2次側一線地絡時の解から，しいては2次側線間短絡時の解から簡単な回路定数等の変換により直接得られることを示した。最後に，これらの4つの故障時におけるトルクに関して解析を行ない，この場合も電流解と同様に2次側線間短絡時のトルク式より他の三つの故障状態におけるトルク式がすべて直接導出できることを示した。

以上前稿および本稿における検討により，AESM の不平衡突発短絡現象のうち線間短絡故障と一線地絡故障は統一的に論ずることができるということが解った。最後に，本研究に対して御協力戴いた北海道大学大学院修士課程学生，鷲田　栄君に感謝申し上げます。

文　献

1) 田村淳二，長谷川淳，藤原　一：“交流励磁型同期機の解析—定常運転状態—”，電気学会論文誌，Vol. 103-B, No. 2, p. 93 (1983).
2) 田村淳二，福田成彦，長谷川淳，藤原　一：“交流励磁型同期機の解析—過渡運転状態—”，電気学会論文誌，Vol. 104-B, No. 1, p. 17 (1984).
3) 田村淳二，長谷川淳，藤原　一：“交流励磁型同期機の解析—V 特性に関する解析—” 電気学会論文誌，Vol. 104-B, No. 3, p. 181 (1984).
4) C. Concordia,' S. B. Grary & G. Kron: “The Doubly Fed Machine', AIEE Trans., Vol. 61, p. 286 (1942).
5) R. E. Bedford: “The Synchronous Double-Fed Induction Machine”, AIEE Trans., Vol. 75, p. 1486 (1956).
6) B. M. Bird & R. F. Burbidge: “Analysis of Doubly Fed Slip-ling Machines”, Proc. IEE, Vol. 113, No. 6, p. 1016 (1966).
7) R. D. Jackson & B. W. Phillips: “Steady-State Stability of the Doubly Fed Synchronous Machine”, Electronics Letters, Vol. 4, No. 1, p. 18 (1968).
8) N. L. Schmitz & W. F. Long: “The Cycloconverter Driven Doubly-Fed Induction Motor”, IEEE Trans., Vol. PAS-90, No. 2, p. 526 (1971).
9) P. T. Finlayson & D. C. Washburn: “Cycloconverter-Controlled Synchronous Machine for Load Compensation on AC Power Systems,” IEEE Trans., Vol. IA-10, No. 6, p. 806 (1974).
10) W. B. Gish, J. R. Schurz, B. Milano & F. R. Schleif: “An Adjustable Speed Synchronous Machine for Hydroelectric Power Applications”, IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 5, p. 2171 (1981).
11) P. G. Homes & N. A. Elsonbaty: “Cycloconverter-Excited Divided-Winding Doubly-Fed Machine as a Wind-Power Converter,” Proc. IEE, Vol. 131, Part-B, No. 2, p. 61 (1984).
12) 坪井和男，井口昭彦：“非同期化同期機の基本特性解析”，電気学会論文誌，Vol. 101-B, No. 11, p. 643 (1981).
13) 中村光一，藍原隆司：“電力系統における二軸励磁同期発電機の非同期同期運転の解析と試験”，電気学会論文誌，Vol. 104-B, No. 6, p. 365 (1984).
14) 田村ほか：北見工大研報，Vol. 16, No. 2 (1985), (前稿).