同期機の線間突発短絡時における健全相電圧

正員 一杉 和良 (関東学院大学) 正員 森安 正司 (関東学院大学)
正員 村岡 政義 (富士電機株式会社)

Open-Phase Voltage at Suddenly Line-to-Line Short Circuit of Synchronous Machine.
Kazuyoshi Hitosugi, Member, Shoji Moriyasu, Member (Kanto Gakuin University)
Masayoshi Muraoka, Member (Fuji Electric Co., Ltd.)

Synchronous machine generates the sinusoidal voltage on the balanced load operation. In case of the line-to-line short circuit, it generates the harmonic voltage on the open-phase of synchronous machine, if the direct and quadrature subtransient reactance are not equal as the machine without connection of the damper windings between poles. The harmonic orders of the voltage waveform on the open-phase winding consist of not only odd numbers, but also even numbers.

When this harmonic voltage is resonant with network with capacitor, the overvoltage arise on the network.

This paper shows the voltage waveform and the harmonic contents of the open - phase voltage by the analytical voltage equation without decay of the magnetic flux.

キーワード：同期機，線間突発短絡，健全相電圧，高調波電圧，過電圧，高調波共振

1. はしがき

同期機の無負荷誘導起電圧の波形狂い率は、通常数パーセント以下でその電圧波形はほぼ正弦波である。

したがって、同期機が平衡負荷運転をしている場合には、同期機から高調波電圧を発生することはないと考えて良い。しかし、同期機が線間短絡事故を発生すると、直軸と横軸の初期過渡リアクタンスが異なる同期機 ($x_d'' \neq x_q''$) では、同期機の端子には基本波電圧以外に高調波電圧を発生する。特に、制動巻線の極間接続が無い同期機では x_d'' と x_q'' の差異が大きいため ($x_q''/x_d'' \approx 1.3 \sim 2$)、同期機の端子に発生する高調波電圧成分は大きくなる。

線間突発短絡電流に直流電流成分がなければ奇数次高調波電圧 ($v=3, 5, 7, \dots$) のみであるが、直流電流成分がある場合には奇数次以外に偶数次高調波電圧 ($v=2, 4, 6, \dots$) も発生する。したがって、系統に力率改善用の進相コンデンサが線路間に接続されていると、この高調波電圧によって発電機および線路のインダクタンスと進相コンデンサが共振し、高調波過電圧を発生して設備の損傷原因となる⁽¹⁾。

線間突発短絡時における発電機の健全相電圧を、短絡電流の減衰も考慮して解析的に求めることは実質的に不可能であるので、本論文では減衰を無視した場合の解析解を用いて電圧波形の形状および高調波成分の大きさについて検討した。なお、鉄心の磁気飽和は無視している。

2. 突極形同期機の制動巻線構造

図1は突極形同期機の回転子構造を示す写真で、磁極表面には制動棒がスロットに挿入され磁極端部において端絡環に接続される。図1(a)は制動巻線の極間接続が有る構造で、通常の突極形同期機に採用されている。

図1(b)は制動巻線の極間接続が無い構造で、機械の保守点検などを便利にするために、約20MVA以下の中小容量の水車発電機に採用されることがある。

横軸と直軸の初期過渡リアクタンスの比 $k = x_q''/x_d''$ は回転子巻線(制動巻線と界磁巻線)の対称性を表す尺度であるが、この大きさは制動巻線の極間接続の有無によって大きく異なる。

極間接続の有る突極形同期発電機および発電電動機では $k=0.9 \sim 1.25$ 程度である⁽²⁾。一方、制動巻線の極間接続が無い突極形同期機では $k=1.3 \sim 2.0$ 程度である。

極間接続が無い場合には、横軸制動巻線電流は制動棒、塊状の磁極鉄心端板および回転子継鉄を介して流れる。

制動巻線電流は交流であるので、磁極鉄心端板と回転子継鉄の極く表面のみに流れ、この部分のインピーダンスの影響を強く受ける。また、電流は制動棒と磁極鉄心端板および磁極鉄心端板と回転子継鉄間の接触抵抗の影響も受ける。このため、 x_q'' は x_d'' に比べて鉄心端部のインピーダンスが加わるので $k = x_q''/x_d''$ は大きくなる。

直軸巻線と横軸巻線は空間的に電気角で90度の位置にあるので、回転子巻線は $x_d'' = x_q''$ の場合には等価的に平衡二

(a)制動巻線の極間接続有

(b)制動巻線の極間接続無

図1 突極形同期機の回転子構造

Fig.1. Rotor of salient-pole synchronous machine.

相巻線であり、 $x_d'' \neq x_q''$ の場合には不平衡二相巻線であるとみなすことができる。したがって、たとえばギャップに回転子からみて時計方向に回転する磁界(磁界の極ピッチは磁極ピッチ τ_p と同一)があると、回転子巻線(制動巻線と界磁巻線)には誘導電流が流れ、この誘導電流によって生じる磁界は $x_d'' = x_q''$ の場合には時計方向のみに回転する磁界であるが、 $x_d'' \neq x_q''$ の場合には時計方向以外に反時計方向に回転する磁界も生じる。この反時計方向の磁界(元のギャップ磁界が反時計方向に回転する場合には時計方向の磁界)が、電機子巻線に高調波誘導起電力を発生する原因である。なお、線間短絡現象を取り扱っているので、電機子巻線も不平衡二相巻線となるので、電機子電流によって時計方向と反時計方向の磁界ができる。

3. 線間突発短絡電流

3.1 短絡前の電圧波形

図2に示すように、同期発電機が無負荷で運転中にb, c相端子間で突発短絡が生じた場合について述べる。

同期機の無負荷誘導起電力は正弦波として、各相電圧を単位法で表すと次式となる。

$$\left. \begin{aligned} v_{a0} &= -u \cdot \sin \theta \\ v_{b0} &= -u \cdot \sin(\theta - 2\pi/3) \\ v_{c0} &= -u \cdot \sin(\theta - 4\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\theta = 2\pi f t + \theta_0 \quad (2)$$

図2 線間突発短絡

Fig.2. Suddenly line-to-line short circuit.

u は単位法で表した端子電圧で、定格時は $u=1$ である。 θ は位相角、 t は短絡後の時間、 θ_0 は短絡発生時の位相である。線間短絡前のb, c相間の線間電圧 v_{bc0} は

$$v_{bc0} = v_{b0} - v_{c0} = \sqrt{3} \cdot u \cdot \cos \theta \quad (3)$$

となる。

3.2 線間突発短絡電流

短絡前のb, c相間電圧を(3)式で表すと、突発短絡電流 i は次式で与えられる⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$\begin{aligned} i &= i_b = -i_c \\ &= \sqrt{3} \cdot u \cdot \left[\left(\frac{1}{x_d'' + x_2} - \frac{1}{x_d' + x_2} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_{dII}}} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{x_d' + x_2} - \frac{1}{x_d + x_2} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{x_d + x_2} \right] \\ &\quad \times (\sin \theta - b \cdot \sin 3\theta + b^2 \cdot \sin 5\theta - \dots) \\ &\quad - \frac{\sqrt{3} \cdot u}{x_2} \cdot \sin \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \left(\frac{1}{2} - b \cdot \cos 2\theta + b^2 \cdot \cos 4\theta - \dots \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{\sqrt{x_q''} - \sqrt{x_d''}}{\sqrt{x_q''} + \sqrt{x_d''}} \\ T_{dII} &= \frac{x_d'}{x_d''} \cdot \frac{x_d'' + x_2}{x_d' + x_2} \cdot T_d'' \\ T_{dII}' &= \frac{x_d}{x_d'} \cdot \frac{x_d' + x_2}{x_d + x_2} \cdot T_d' \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、

x_d'' , x_q'' : 直軸と横軸の初期過渡リアクタンス[pu],
 x_d' : 直軸過渡リアクタンス[pu], x_d : 直軸同期リアクタンス[pu], T_d'' : 直軸短絡初期過渡時定数[s], T_d' : 直軸短絡過渡時定数[s], T_a : 電機子時定数[s]

短絡電流の主成分は基本波電流と直流電流成分であるが、(4)式の第1項は基本波電流に基因して発生する電流であり、第2項は直流電流成分に基因して発生する電流である。定格回転速度を n として、電機子巻線と回転子巻線の相互作用によって誘導する高調波電流の関係を図3に示す。

図3 電機子と制動巻線の高調波電流の周波数

Fig.3. Frequency of armature and damper windings.

高調波電流成分は b の関数であり、 $b=0$ ($x_d'' = x_q''$) の場合には基本波成分のみとなり、発電機端子間には高調波成分の電圧は生じない。 b が大きく、すなわち x_q''/x_d'' が大きくなるとともに、高調波成分は大きくなる。

$\sin \theta_0 = 0$ ($\theta_0 = 0, \pi$)、すなわち(3)式より b, c 相間の無負荷電圧 v_{bc0} が波高値で短絡すると、(4)式の第2項は零となり、電機子時定数で減衰する偶数次高調波電流は現れない。なお、(4)式より定常状態においても $3f, 5f, 7f, \dots$ の高調波成分の電流が流れる。

4. 線間突発短絡時の健全相電圧

4.1 健全相電圧の解析解

線間突発短絡時の健全相電圧 v_a の解析解の導出は実質的に不可能である。しかし、高調波電圧が最も大きくなる短絡初期では、減衰を無視することによって解析解を近似的に求めることができる⁽⁴⁾。鉄心飽和と減衰を無視したときの健全相電圧は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} v_a &\doteq -u \cdot \sin \theta + u \cdot \frac{A}{B} \\ A &= (k-1) \cdot [k+1+(k-1) \cdot \cos 2\theta] \\ &\quad \times [2 \cdot (\sin \theta - \sin \theta_0) \cdot \cos 2\theta + \sin 2\theta \cdot \cos \theta] \\ &\quad + 2 \cdot (k-1)^2 \cdot (\sin \theta - \sin \theta_0) \cdot \sin^2 2\theta \\ B &= [k+1+(k-1) \cdot \cos 2\theta]^2 \\ k &= \frac{x_q''}{x_d''} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

k は制動巻線の d, q 軸に関する非対称性の度合いを表している。 v_a の極値は $\partial v_a / \partial \theta_0 = 0$ 、 $\partial v_a / \partial \theta = 0$ より求め、 $\cos \theta_0 = \cos \theta = 0$ となる。

さらに、 $|v_a|$ の最大値は $\theta_0 = \pi/2$ 、 $\theta = 3\pi/2$ および $\theta_0 = 3\pi/2$ 、 $\theta = 5\pi/2$ ($\pi/2$) のときに生じる。

この値を(6)式に代入すると $|v_a|$ の最大値は $(2k-1) \cdot u$ となる。 $|v_a|$ 最大となる条件と最大値は符号も考慮して表すと表1となる。

表1 v_a の最大条件と最大値Table1 maximum of v_a .

θ_0	θ	v_{amax}
$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{2}$	$(2k-1) \cdot u = \left(2 \cdot \frac{x_q''}{x_d''} - 1 \right) \cdot u$
$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{2} \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$-(2k-1) \cdot u = -\left(2 \cdot \frac{x_q''}{x_d''} - 1 \right) \cdot u$

なお、上記のことは次項の図により明らかになる。

4.2 健全相電圧波形

図4に短絡位相 θ_0 を変えて、 $k=1.0 \sim 2.5$ に対する線間突発短絡時の健全相電圧波形 v_a を示す。

図の縦軸は、 U を短絡前の線間電圧実効値[V]として、短絡前の相電圧波高値 ($\sqrt{2} \cdot U / \sqrt{3}$) に対する健全相電圧瞬時値 V_a [V] の比で示している。

$$\frac{v_a}{u} = \frac{V_a}{\sqrt{2} \cdot U / \sqrt{3}} \quad (7)$$

$\theta = \theta_0$ で短絡した場合の1周期は $\theta = \theta_0 \sim 2\pi + \theta_0$ であるが、図4では $\theta = 2\pi \sim 2\pi + \theta_0$ の波形は $\theta = 0 \sim \theta_0$ の範囲に示している。(6)式より、短絡位相 θ_0 と健全相電圧 v_a は次の関係がある。

- (1) $0 \leq \theta_0 \leq \pi$ の範囲では、 $\theta_0 = \alpha$ と $\theta_0 = \pi - \alpha$ における $v_a(\theta)$ は同一である。
- (2) $\pi \leq \theta_0 \leq 2\pi$ の範囲では、 $\theta_0 = \pi + \alpha$ と $\theta_0 = 2\pi - \alpha$ における $v_a(\theta)$ は同一である。
- (3) $\theta_0 = \alpha$ の健全相電圧 $v_a(\theta)$ と $\theta_0 = \pi + \alpha$ の健全相電圧 $v_a^*(\theta)$ の間には $v_a^*(\theta) = -v_a(\pi + \theta)$ の関係がある。

以上より、 $v_a(\theta)$ は $0 \leq \theta_0 \leq \pi/2$ の波形が代表的な電圧波形である。図5に $|v_a|$ の最大値と θ_0 の関係を表す。

図より $\theta_0 = \pi/2$ (図4(c))、 $3\pi/2$ (図4(f)) のときに、 v_a は最大となり表1の関係を満たしていることが分る。すなわち、突発短絡電流 i の直流電流成分が最大となる短絡位相 θ_0 ($\pi/2, 3\pi/2$) のときに健全相電圧 v_a は最大となる。

一方、 $\theta_0 = 0, \pi$ (直流電流成分無) のときの v_a の最大値は、 $\theta_0 = \pi/2, 3\pi/2$ で発生しているので、この条件を(6)式に代入すると

$$|v_{amax}| = k \cdot u = \frac{x_q''}{x_d''} \cdot u \quad (8)$$

となる。

図6に $|v_{amax}|$ と $k = x_q''/x_d''$ の関係を示す。図より、 $k = x_q''/x_d''$ と $|v_{amax}|$ は比例関係にあることが分る。なお、 $|v_{amax}|$ は短絡位相 θ_0 によって異なり、次式の範囲となる。

$$\frac{x_q''}{x_d''} \cdot u \leq |v_{amax}| \leq \left(2 \cdot \frac{x_q''}{x_d''} - 1 \right) \cdot u \quad (9)$$

図4 健全相電圧波形
Fig.4. Wave form of open-phase voltage.

図5 健全相電圧最大値と短絡位相の関係
Fig.5. Relations between open-phase maximum voltage and phase angle of short circuit.

図6 健全相電圧最大値と $k = x_q''/x_d''$ の関係
Fig.6. Relations between $|v_{\max}|$ and k .

4.3 ギャップ磁束

線間突発短絡時の健全相電圧は、鉄心飽和を無視して求めたものである。しかし、磁束量が定格磁束に比べて大きいと鉄心飽和の影響を受けることになる。

各相の巻数を W_1 、基本波巻線係数を k_w とすると、健全相の磁束 Φ_a [Wb] と電圧 V_a [V] の間には

$$V_a = -W_1 \cdot k_w \cdot \frac{d\Phi_a}{dt} \quad (10)$$

の関係がある。

定格周波数を f [Hz]、定格磁束を Φ_n [Wb] とすると、定格相電圧の波高値 V_n は、

$$V_n = 2\pi f \cdot W_1 \Phi_n \cdot k_w \quad (11)$$

であるので、単位法で表した相電圧 $v_a = V_a/V_n$ と磁束 $\phi_a = \Phi_a/\Phi_n$ の間には次の関係がある。

$$v_a = -\frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{d\phi_a}{dt} = -\frac{d\phi_a}{d\theta} \quad (12)$$

電圧と磁束には直流成分はないので、図4の電圧波形より、 $\theta = \pi/2$ と $3\pi/2$ において $\phi_a = 0$ となる。このことを考慮すると、磁束の時間波形は次式で与えられる。

$$\phi_a = -\int_0^\theta v_a d\theta + \int_0^{\pi/2} v_a d\theta = -\int_{\pi/2}^\theta v_a d\theta \quad (13)$$

図7に $\theta_0 = 0$ ($|v_{amax}|$ が最小) と $\theta_0 = \pi/2$ ($|v_{amax}|$ が最大) に対する磁束を示す。

図7 ギャップ磁束波形 ($u=1$)

Fig.7. Wave form of air gap flux ($u=1$).

また、図8に線間突発短絡後の健全相電圧と磁束の最大値の関係を示す。図より、 $\theta_0 = 0$ の場合、 k が変化しても磁束の最大値はほとんど変化しないので、鉄心飽和の影響は受けないことが分る。

一方、 $\theta_0 = \pi/2$ の場合は k が大きくなるにつれて磁束の最大値も増加する。したがって、鉄心飽和の影響を受けるので、 $|v_{amax}|$ は表1の値より小さくなるが、その大きさは鉄心飽和と電流の減衰を考慮した過渡現象解析などによって求める必要がある。

図8 健全相電圧とギャップ磁束の関係 ($u=1$)

Fig.8 Relations between $|v_{amax}|$ and air gap flux ($u=1$).

5. 健全相電圧の高調波成分

4項に述べたように、健全相電圧波形 v_a は $\theta_0 = 0 \sim \pi/2$ で代表することができる。

図9および表2($k=2$ の場合)に $\theta_0 = 0, \pi/4, \pi/2$ のときの高調波成分の大きさを示す。高調波成分は無負荷相電圧を100%として示している。

図9と表2から分るように、奇数次高調波成分は短絡位相 θ_0 に無関係に同一値である。

また、短絡電流に直流成分がない $\theta_0 = 0$ の場合では、健全相電圧には偶数次高調波は現れない。

なお、無負荷時における誘導起電力の波形狂い率が大きい機械であっても、線間には偶数次と3の倍数の高調波電圧は発生しない。この無負荷時の高調波電圧は、ギャップの空間高調波磁界によって発生するもので、磁極ピッチを τ_p とすると高調波磁界の極ピッチ τ_{pv} は τ_p/v である。

一方、線間短絡時の高調波電圧に対応するギャップ磁界の極ピッチはすべて磁極ピッチ τ_p であり、磁界の回転速度が基本波電圧に対応するギャップ磁界速度の v 倍になる。

図9 健全相電圧の高調波成分 ($u=1$)
Fig.9 Harmonic components of open-phase voltage.

表2 健全相電圧の高調波成分 ($k = x_q''/x_d'' = 2.0$)
Table 2 Harmonic components of open-phase voltage.

次数 ν	高調波成分 [%]		
	$\theta_0 = 0$	$\theta_0 = \pi/4$	$\theta_0 = \pi/2$
1	117.2	117.2	117.2
2	0.0	48.5	68.6
3	60.3	60.3	60.3
4	0.0	16.7	23.6
5	17.2	17.2	17.2
6	0.0	4.3	6.1
7	4.1	4.1	4.1
8	0.0	1.0	1.4
9	0.9	0.9	0.9
10	0.0	0.2	0.3
11	0.2	0.2	0.2
12	0.0	0.0	0.1

6. むすび

鉄心飽和と磁束の減衰を無視して、制動巻線の極間接続の無い同期機の線間突発短絡時の健全相電圧の波形と高調波成分について述べた。要約すると次の通りである。

- (1) 直流電流成分が最も大きくなる位相 ($\theta_0 = \pi/2, 3\pi/2$) での短絡したときの健全相電圧最大値 $|v_{amax}|$ は $(2 \cdot x_q''/x_d'' - 1)u$ である。この事実は公知である。磁束は定格値以上となるので、鉄心飽和を考慮すると $|v_{amax}|$ は上記より低減した値となるが、その大きさは鉄心飽和と電流の減衰を考慮した過渡現象解析などによって求める必要がある。
- (2) 直流電流成分が生じない位相 ($\theta_0 = 0, \pi$) で短絡したときの健全相電圧の最大値 $|v_{amax}|$ は $x_q''/x_d'' \cdot u$ である。このときの磁束はほぼ定格値であるので、 $|v_{amax}|$ は鉄心飽和の影響はほとんど受けない。
- (3) 健全相電圧に含まれる奇数次高調波成分の大きさは短絡位相 θ_0 に無関係に一定である。一方、偶数次高調波成分は θ_0 によって変り、 $\theta_0 = 0, \pi$ で零となる。

本論文は線間突発短絡時の健全相電圧に対する解析解から導出される電圧波形、高調波成分などを求めた。

(平成 13 年 7 月 3 日受付, 平成 13 年 11 月 20 日再受付)

参考文献

- (1) E. Clarke, C. N. Weygandt, C. Concordia, "Overvoltages Caused by Unbalanced Short Circuits", Electrical Engineering, p.453~468 (1938)
- (2) 同期機諸定数調査専門委員会, "1980 年以降に製作された大容量同期機諸定数の調査結果", 電気学会技術報告, No.763 (1999)
- (3) C. Concordia, "Synchronous Machines", John Wiley & Sons (1951)
- (4) K. Bonfert, "Betriebsverhalten der Synchronmaschine", Springer-Verlag (1962)

一杉 和良 (正員) 1974 年 3 月 4 日生。1997 年 3 月関東学院大学工学部電気・電子工学科卒業。1999 年 3 月同工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月同工学研究科電気工学専攻博士後期課程入学。現在に至る。
1999 年電気学会優秀論文発表賞受賞。

森安 正司 (正員) 1937 年 1 月 1 日生。1959 年 3 月京都大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月富士電機製造株式会社(現 富士電機株式会社)入社。1993 年 4 月関東学院大学工学教授, 現在に至る。工学博士。第 1 種電気主任技術者。1982 年電気学会進歩賞受賞。

村岡 政義 (正員) 1952 年 4 月 16 日生。1975 年 3 月慶応義塾大学工学部電気工学科卒業。1975 年 4 月富士電機製造株式会社(現 富士電機株式会社)入社。大形回転機の開発, 設計業務に従事。現在, 電機システムカンパニー エネルギー製作所発電機部長。