

自動切換装置の電圧, 電流変動

嶋 田 幸 重
戸 倉 勇 治
山 崎 正 木

Voltage and Current Fluctuation in Automatic Transfer Switches

Yukishige Shimada
Yuji Tokura
Masaki Yamazaki

Owing to the growing complexity and increased refinement of modern production system, even a short-time interruption of service sometimes causes damage to production facilities, or an increased production cost. Therefore, in the plants subjected to severe damage by the power suspension, automatic transfer switches are installed, with which, in case of the suspension, change-over of the normal lines to the stand-by lines is made within a short-time (1-2 seconds).

The change-over within this short time, however, generates specific transient phenomena to the fluctuations in voltage and current.

For example, after breaking from the normal lines, there remains a residual voltage in the circuit, though attenuating, which occasionally produces a phase difference between the residual voltage and the normal voltage of the stand-by lines after the change-over to the stand-by lines, causing an extreme rush current flowing through the circuit, partly due to the starting current load of the induction motor. And even when the changing-over is made after a residual voltage has been reduced to zero, an extreme rush current occurs as well.

We, therefore, experimented in actual loading of the plant, and obtained the following results:

1. When the no-voltage period exceeded 1 second, the residual voltage in the circuit became zero.
2. When the change-over was made before a residual voltage dissipated out, a phase difference occurred between the voltages of the normal source and the stand-by source of power.

Sometimes, the phase difference up to 90° occurred, and a 950 % rush current then flowed in the circuit, although the current became stationary in 0,7 second after switching on to stand-by source.

3. When a change-over was made after a residual voltage had been reduced to zero, a rush current 5 to 9 times larger flowed due to a starting current load of an induction motor, but the current became stationary 2 or more seconds later.

1. ま え が き

最近, 生産工程の複雑化, 高度化により短時間の停電でも生産設備に損傷をあたえ, かつ災害事故を発生したり, 再運転に長時間を要して休止損失を大きくすることがあるので, このような設備には供給信頼度の高い自家発電電力を送電するとともに, これが万一停電すること

があっても短時間(1~2秒)で買電電力に切替わる自動切換装置を設置し, 負荷設備にも自動再投入装置を付属させて, 連続運転できるようにしている。

このように重要な自動切換装置をより合理的な設備にするために, 実際の負荷を接続した場合の切換時における電圧, 電流変動の特殊な過度現象を解析検討すること

は極めて重要なことである。

1 台の電動機の電源切換えを行なう場合の過度現象については、竹内氏¹⁾の理論的解析、山田、城条両氏²⁾のアナログコンピュータによる解析その他がなされているが、数多くの電動機が並列に運転され、その全体の電動機群が切換えられる場合の実験、解析はなされていない。

自動切換装置の切換時における過度現象としては次のようなものがある。

- (1) 停電後の母線残留電圧
- (2) 停電後の母線残留電流
- (3) 再投入時の電圧降下
- (4) 再投入時の突入電流

ここでは停電後の母線残留電圧と再投入時の突入電流について実験結果をオシログラムで説明する。

2. 実験の内容

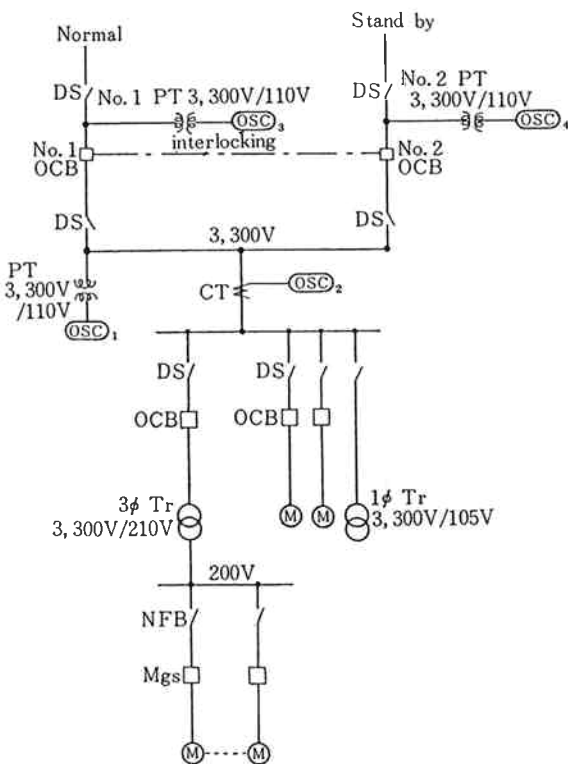


Fig. 1 Single line diagram of an automatic transfer switch

Fig. 1 は自動切換装置の概要を示した単線接続図で、自家発電系統の常用がトリップすると短時間(1~2秒)の切換時間において、電気的インターロックにより予備OCBが投入される。

現在当工場には自動切換装置が11組設置されているが、この中のA, B, C, DおよびEの変電所5組で実負荷試験を行なった。

Fig. 1 によって自動切換装置の動作説明を概説すると、常用線の電圧を計器用変圧器により検出し、正規電圧の $\frac{60V}{110V} \times 100 = 54.5\%$ 以下になると不足電圧継電器が動作し、予備線電圧が 54.5% 以上あることを条件にして補助継電器を介して No. 1 OCB をトリップさせ、続いて No. 2 OCB を投入させる。Fig. 1 からわかるように常用線の電圧が54.5%以下になればもちろん自動切換を行なうが、PT回路に異常発生して2次電圧がゼロになっても不足電圧継電器は動作して自動切換動作を行ない、不足電圧継電器が動作開始してから、No. 2 OCB 投入完了までの全切換時間は回路の時定数により一定であるから、それぞれの残留電圧は Fig. 2 の(a), (b)に示す通りとなり、後者の場合が過度現象としては複雑となる。

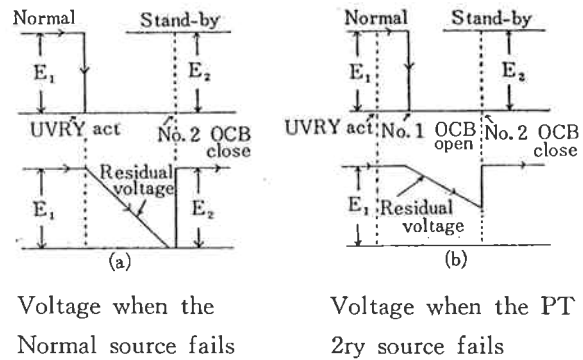


Fig. 2 Voltage at instant of changing over source

従ってA変電所では特にPT回路を開放することによる自動切換の実験を行ない、B~E変電所では常用線の電源を瞬時ゼロにすることによる自動切換を行なった。

A変電所の場合は常用線および予備線のPT2次側にそれぞれオシログラムのエレメントを接続し(OSC2およびOSC4)、自動切換母線のPT2次側を主回路のCT2次側にもオシログラムエレメントを接続し(OSC1とOSC4)、常用線(または予備線)のPT2次電圧をゼロにすることにより誘導電動機負荷 105kw および電灯負荷 20kw の電力を自動切換えた。

B, C, DおよびEの場合は自動切換母線のPT2次側と主回路のCT2次側にオシログラムエレメントを接続(OSC1とOSC2)、常用線の電圧をゼロにすることによりTable. 1 に示す負荷電力を自動切換えた。いずれの場合も自動切換えは完全に動作し電圧、電流の過度現象をオシログラムで撮影できた。

3. 実験結果と検討

A変電所の常用から予備への自動切換時のオシログラムを Fig. 3 に示す。常用 OCB がトリップしてからの残留電圧の減衰は極めてゆるやかであり、予備 OCB が投入されるまでの 15cps (0.25sec) の間にわずか健全電圧の72% (2,500V) まで低下したに過ぎず不足電圧継電器の整定は $\frac{600V}{110V} = 54.5\%$ であるから P T 回路が健全であれば自動切換しない電圧である。再投入時には残留電圧と投入電圧との位相差は 45° で突入電流は切換前の負荷電流の85%になっている。

同じA変電所の予備から常用への自動切換時のオシログラムを Fig. 4 に示す。

この場合の残留電圧の減衰も極めてゆるやかでトリップしてから 15.5cps (0.26sec) 経過して69% (2,380V) まで低下しただけで、これも54.5%以上であり P T 回路が健全であれば自動切換しない電圧である。再投入時の

残留電圧と投入電圧との位置差は 90° もありこのため突入電流は切換前の負荷電流の95%にも達している。

B変電所の常用から予備への自動切換時のオシログラムを Fig. 6 に示す。この試験では常用電源を瞬時にゼロにし、予備 OCB 投入まで 77.5cps (1.29sec) の長時間限であったため残留電圧はゼロになっている。しかし、この間低圧電動機群は機械的負荷によりほとんどゼロ近くまで減速されており、予備 OCB 投入時には静止状態の電動機を起動する時の5~8倍の起動電流を規定速度まで増速される起動時間 78cps (1.30sec) 流している。これを切換前の負荷電流と比較すれば95%に相当する突入電流となっている。C, D, E変電所でもBとほぼ同じ傾向を示しており、オシログラムは、Fig 5~9の通りである。

切換時の電圧、電流切換時間についてこれを表示すれば Table 1 の通りである。

Table. 1 Times, voltage and current at changing over power source

Substation	Performance	Change over time		Load	Minimum residual voltage	Phase angle	Rush current	Starting time
		Total time	No voltsge time					
A	Normal →Stand by	47 cycle (0.78sec)	15 cycle (0.25sec)	Motor 105kw Lamp $\frac{20}{125}$	2,500 V (72%)	45°	850%	0.73sec
A	Stand by →Normal	49.5 (0.82)	15.5 (0.26)		2,800 (69)	90	950	—
B	Normal →Stand by	77.5 (1.29)	56 (0.93)	Motor 290 Lamp $\frac{30}{320}$	0	—	950	1.30
C	Normal →Stand by	92.4 (1.54)	61.2 (1.02)	Motor 230 Lamp $\frac{70}{300}$	0	—	830	1.56
D	Normal →Stand by	127.8 (2.13)	48 (0.8)	Motor 780 Lamp $\frac{20}{800}$	0	—	560	2.40
E	Normal →Stand by	99.6 (1.66)	12 (0.2)	Motor 1.400 Lamp $\frac{100}{1.500}$	0	—	580	2.10
E	Stand by →Normal	28.2 (0.47)	0		1,560 (45)	45	530	0.82

〔1〕 残留電圧

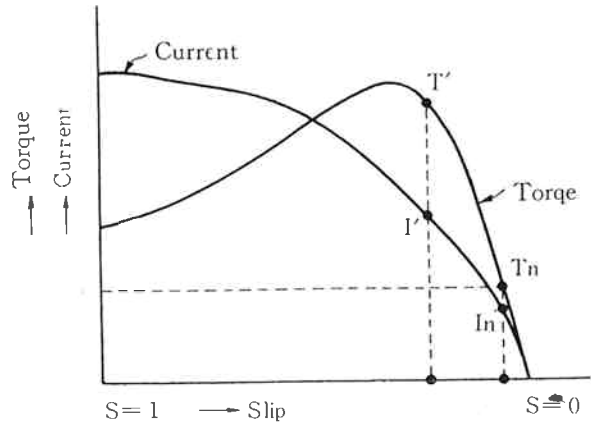
電動機による残留電圧は、回転子の残留電流による減衰磁束が回転によって固定子巻線を切るために生じるもので1台の電動機の電源切換時の残留電圧は多軸行列法⁴⁾で表示すれば次式¹⁾の通りである。

$$\begin{bmatrix} e_{11}'(t) \\ e_{12}'(t) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} (1-\sigma) \frac{\omega'}{\omega} \frac{\dot{E}_{11}}{\sqrt{2}} \frac{e^{-(x_2-j\omega')t}}{\epsilon} \\ (1-\sigma) \frac{\omega'}{\omega} \frac{\dot{E}_{11}^*}{\sqrt{2}} \frac{e^{-(x_2+j\omega')t}}{\epsilon} \end{bmatrix} \dots(1)$$

要約すれば残留電圧は印加電圧に近く回転速に比例し、

$$x_2 = \frac{R_2}{1_2 + \frac{3}{2}L_2} \text{ によって減衰する。}$$

本実験のように数台～数10台の電動機が接続されている場合でも残留電圧の減衰の傾向はほぼ同じであるが無電圧時間が60サイクル以上になると電動機は著しく機械負荷によって減速されるので残留電圧はほとんどゼロになり、これによる突入電流への影響はほとんど考慮しなくてよいことがわかった。ただ、電圧検出回路のPTに異常発生して2次側電圧がゼロになると、不足電圧継電器が動作してもある時限までは正規電圧は印加されたままで常用OCB開放から予備OCB投入までの15サイクル程度しか無電圧時間がないため、この間の機械的負荷による回転子の減速が緩やかであるため残留電圧も70%程度までしか減衰せずこの残留電圧と新電源との位相に差を生じこれが大きく突入電流に影響をあたえている。すなわち、誘導電動機の起動時のトルク、電流は一般に Fig. 10 の如くになっており減速は緩やかであるから新電源切換時の電流は静止状態からの起動時の電流に比べればあまり大きくないのであるが、この残留電圧の新旧電圧との位相差により異常突入電流が流れることが加わって、それは切換前負荷電流の8.5～9.5倍にも達する場合があることがわかった。しかし、新電源切換時に誘導電動機はある速度まで加速された状態であるために、突入電流は0.7秒程度の短時間に定常状態になっている。



- Tn : torque at normal speed
- In : current at normal speed
- T' : torque at reduced speed
- I' : current at reduced speed

Fig. 10 Characteristic curves of torque and current of 3φ induction motors

〔2〕 突入電流

1台の電動機の電源切換時の突入電流は多軸行列法⁴⁾で表示すれば次式¹⁾の通りである。

$$\begin{bmatrix} i'_1(t) \\ i'_2(t) \epsilon^{j\theta} \end{bmatrix} = \frac{-1/j\omega (1_1 + \frac{3}{2}L_1)}{0} \frac{E_{11}}{\sqrt{2}} \epsilon^{j(\varphi + \omega t_0 + \omega t)} + \frac{1/j\omega' \sigma (1_1 + \frac{3}{2}L_1)}{1/j\omega' \sigma \frac{3}{2}M} \frac{E_{11}}{\sqrt{2}} \epsilon^{j(\varphi + \omega t_0)} \left\{ 1 - \frac{\omega}{\omega'} \epsilon^{-(x - j\omega - \omega')t_0} \right\} \left\{ \epsilon^{-\frac{x}{\sigma}t} (1 - \epsilon^{j\omega' t}) \dots \dots \dots (2) \right.$$

上式で第2項の中の $\left\{ 1 - \frac{\omega'}{\omega} \epsilon^{-(x - j\omega - \omega')t_0} \right\}$ は $\overline{\omega - \omega'} t_0 = 2n\pi, (n=1, 2, 3, \dots)$

のときは $\left\{ 1 - \frac{\omega'}{\omega} \epsilon^{-\frac{x 2n\pi}{\omega - \omega'}} \right\} \dots \dots \dots (3)$

$\overline{\omega - \omega'} t_0 = (2n + 1)\pi, (n=0, 1, 2, 3, \dots)$ のときは $\left\{ 1 + \frac{\omega'}{\omega} \epsilon^{-\frac{x(2n+1)\pi}{\omega - \omega'}} \right\} \dots \dots \dots (4)$

となり (3)式の場合は突入電流は減ずるが、(4)式の場合は非常に増大する。

突入電流は無電圧時間の長短にかかわらず切換前の負荷電流の850～950になっているが、これはつぎのように考えられる。

無電圧時間が短くて残留電圧が70%以上もある場合は切換えられた新電源との位相差が大いに影響し、位相差が180°に近づく程残留電圧と新電圧とのベクトル差によ

る横流が流れこれが異常に大きい突入電流になる。

一方、無電圧時間が60cps以上になれば残留電圧は無視できるほど小となり位相差による突入電流は生じないが、この場合電動機は長時間の無電圧によりほとんど静止状態になっており起動電流としての5～8倍の突入電流を生じることになる。今回の実験では切換後2.0秒以上経過すればこの突入電流は定常状態になっている。

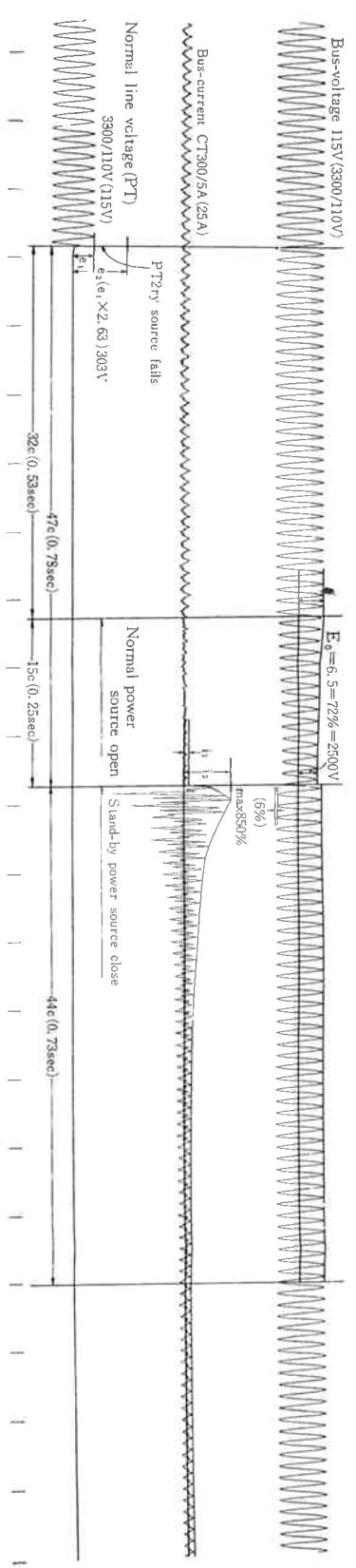


Fig. 3 Oscillograms of voltage and current in the automatic transfer switch (change-over power source) at A substation [Normal-Stand-by]

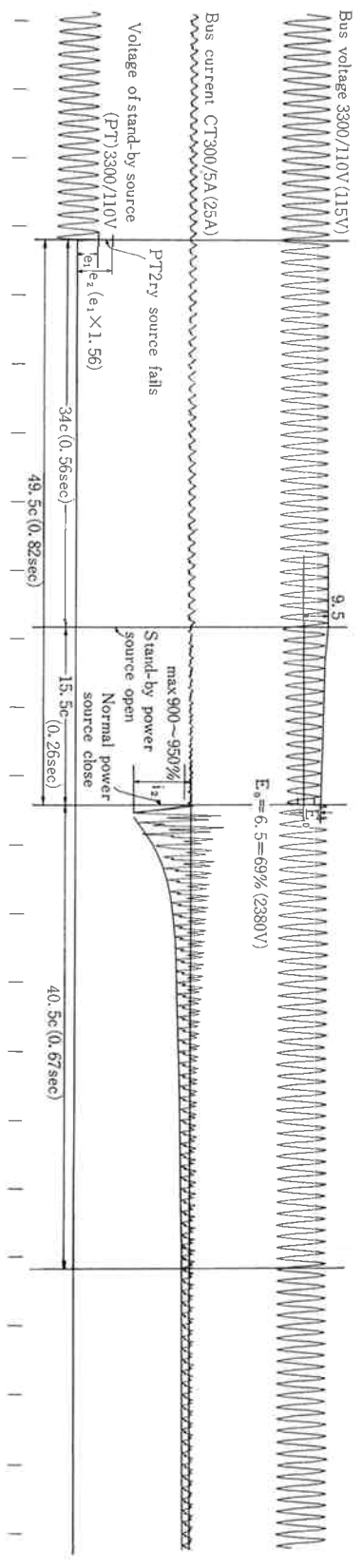


Fig. 4 Oscillograms of voltage and current in the automatic transfer switch (change-over power source) at A substation [Normal-Stand-by]

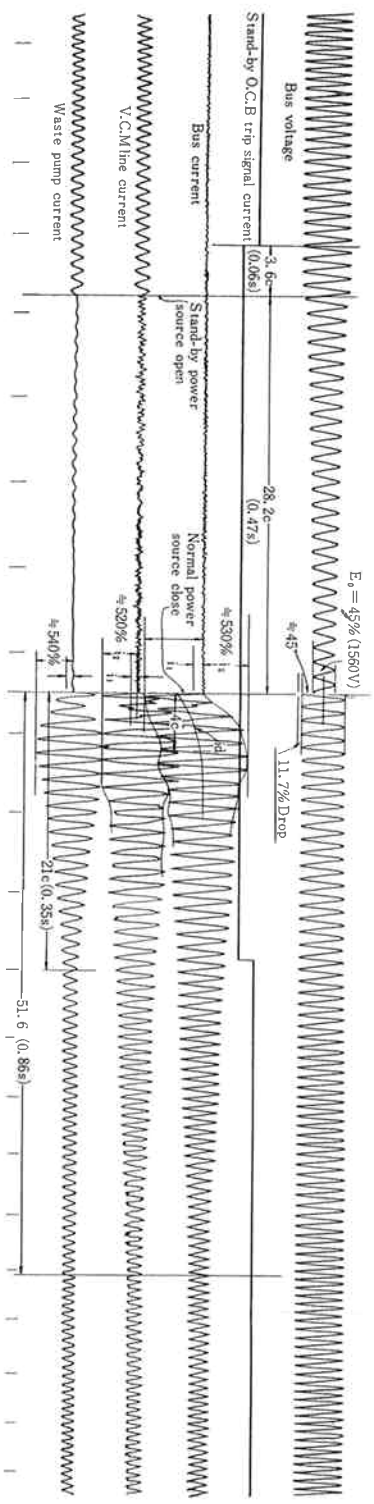


Fig. 5 Oscillograms of voltage and current in the automatic transfer switch (change-over power source) at E substation [Stand-by-Normal]

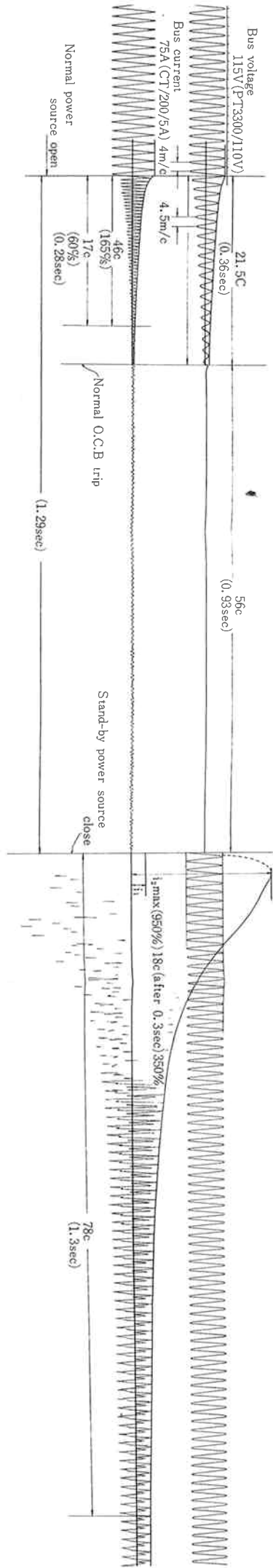


Fig. 6 Oscillograms of voltage and current in the automatic transfer switch (change-over power source) at B substation [Normal→Stand-by]

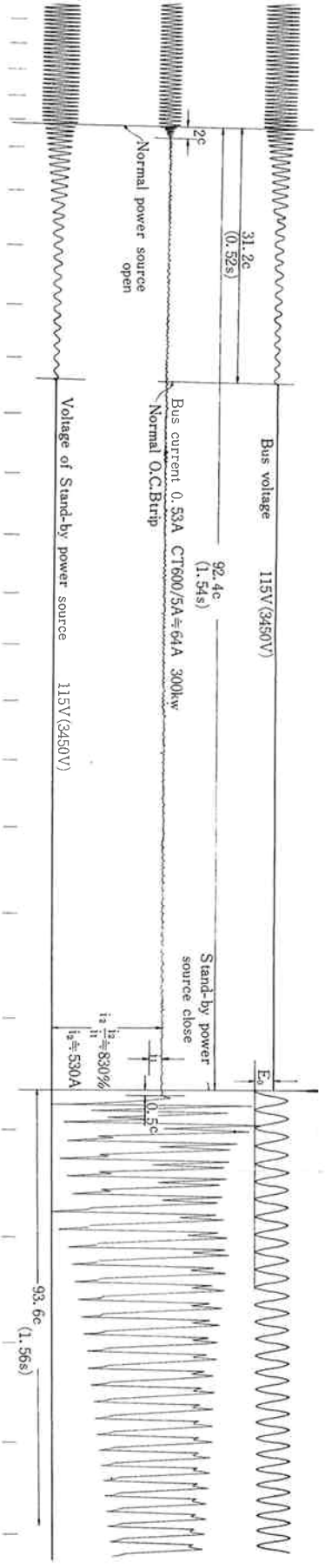


Fig. 7 Oscillograms of voltage and current in the automatic transfer switch (change-over power source) at C substation [Normal→Stand-by]

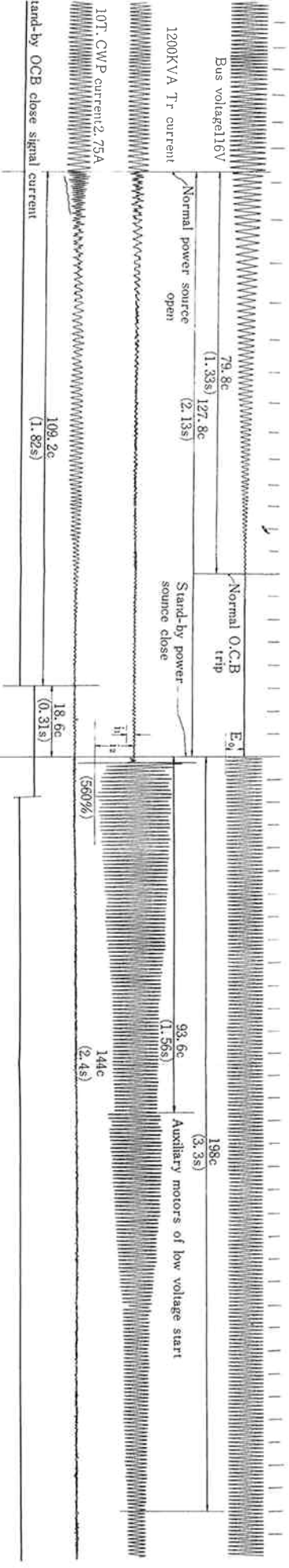


Fig. 8 Oscillograms of voltage and current in the automatic transfer switch (change-over power source) at D substation [Stand-by→Normal]

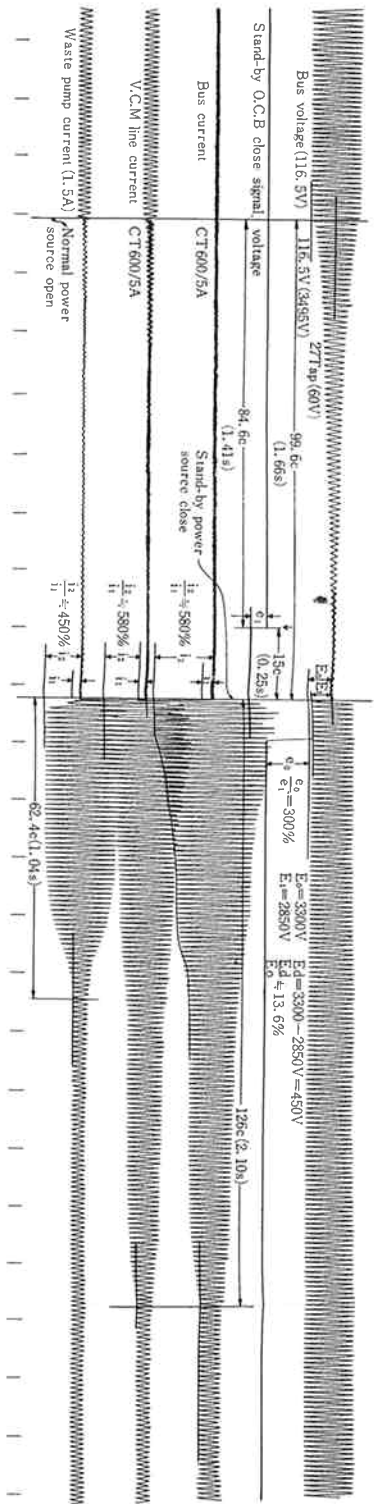


Fig. 9 Oscillograms of voltage and current in the automatic transfer switch (change-over power source) at E substation [Normal→Stand-by]

4. 異常突入電流への対策

自動切換装置では切換時間の長短にかかわらず切換前負荷電流の10倍近い過度的な異常突入電流が流れることがわかったが、これについての対策はつぎのことが考えられる。

- (1) 自動切換装置に接続する電線路、しゃ断器、断路器類は負荷電流の10倍近い過度的突入電流に耐える容量を設置する。
- (2) 過電流保護継電器はこの異常突入電流で誤動作しないよう高い整定値にしておく。
- (3) 電動機負荷は回転子の残留電流による減衰磁束が回転によき固定子巻線を切り残留電圧を誘起する原因であり、また異大な起動電流を流すことにもなるから、自動切換母線に接続する電動機は厳選して少なくし、また手動起動してよいものは自動切換時に一時しゃ断する方式をとる。
- (4) P T 2 次回路の事故を局限させるために不足電圧継電器以降にヒューズを取付け、不足電圧継電器はP T 2 次に直接接続する。
- (5) 残留電圧の減衰が極めてゆるやかな減衰電圧と新電圧との自動切換装置については同期投入装置を考慮する。

5. むすび

今回の7例の実験により切換時間の無電圧時間が60サイクル(1.0秒)以上であれば電源事故の内容如何にかかわらず、突入電流は10倍以下なので電源設備、継電器がこれに耐えれば問題ないことが解った。

P T 2 次回路事故による切換は無電圧時間が15サイクル(0.25秒)程度なので残留電圧がかなり大きく、新

電圧との位相如何ではかなり異常な突入電流が流れると考えられ、今回の2回の実験では10倍以下になっているが今後更に検討すべき問題である。

文 献

- 1) 竹内：電気学会雑誌，79，1,055 (1959)
- 2) 山田，城条：電研技術報告，電力 63003
- 3) 山田：電気学会雑誌，85，1,872 (昭40)
- 4) 竹内：マトリックス記号法，76

附 録

使用記号

- i'_{11} : 固定子の残留電圧の正相分
- i'_{12} : " 逆相分
- ω : 印加電圧の角周波数
- ω' : 切換え後の回転の角周波数
- θ : 固定子と回転子間の電氣的偏差角
- t_0 : 切換え直後からの時間
- \dot{E}_{11} : 電源電圧の正相分
- \dot{E}_{12} : " 逆相分の共範
- φ : $\dot{E}_{11} = E_{11} \varepsilon^{j\varphi}$ よりまとまる値
- x_2 : 回転子のアクタンス
- R_2 : " 抵抗
- l_2 : " もれインダクタンス
- L_2 : " 自己 "
- M : 固定子と回転子間の相互インダクタンス
- l_1 : " のもれインダクタンス
- L_1 : " 自己 "
- σ :
$$\frac{(l_2 + \frac{3}{2}L_1)(l_2 - \frac{3}{2}L_2) - \frac{3}{4}M^2}{(l_1 + \frac{3}{2}L_1)(l_2 + \frac{3}{2}L_2)}$$