基于电容电压的并补输电线路自适应三相重合闸策略

黄 飞1,李凤婷1,解 超1,王 婷1,2,马宏涛2,白海滨2

(1. 新疆大学 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心,新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047;2. 国网新疆电力有限公司 昌吉供电公司,新疆维吾尔自治区 昌吉 831100)

摘要:并补的储能特性会增大三相跳闸后二次电弧持续时间的不确定性,尤其对于高阻故障而言,线路残余 电气量衰减速度过快,将严重影响已有故障性质判据的可靠性,甚至导致线路重合失败。针对上述问题,摒 弃以往以线路残余电气量为依据的思路,利用预充电电容对线路放电,根据电容放电电压变化特性判定线路 故障类型。基于PSCAD/EMTDC平台的仿真结果表明,在不同故障类型、故障位置、过渡电阻下,所提自适 应三相重合闸策略均能保证其判定准确性。

关键词:并补;分布电容;高阻故障;预充电电容;三相重合闸策略

中图分类号:TM 73 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005017

0 引言

我国幅员辽阔、地形复杂、能源分布不均,因此 长距离高电压输电线路较为多见^[1]。为避免线路分 布电容引发的轻载工频过电压、自励磁谐振等问题, 并联电抗器被广泛应用于这些线路中^[2]。近年来, 我国大电网结构日趋完善,无三相不平衡问题的三 相重合闸被应用于高电压输电线路成为可能^[3]。然 而,相比单相重合闸,三相重合闸失败有可能对系统 造成更为严重的二次冲击。因此,亟需研究一种适 用于并补输电线路的三相重合闸新策略,代替现有 的不判定线路故障性质定时限动作的策略。

自20世纪80年代末期西安交通大学葛耀中教 授提出"自适应重合闸"的概念以来,国内外专家学 者针对并补线路三相重合闸问题取得了一系列研究 成果^[4]。常见的故障性质判别方法可分为3类:①利 用线路零模、差模电压^[56]的方法;②基于线路零模、 差模电流^[7-10]的方法;③采用模型参数识别^[11-14]的方 法。上述3种方法均基于对线路实时残余电气量的 测量,线路并补的存在虽然会在一定程度上增强线 路残余电气量的存续性,但是该存续性很容易受到 线路过渡电阻大小的影响^[9,11,14]。尤其对于高阻故 障,线路残余电气量衰减速度很快,可能在故障性质 判定完成前即衰减至使无法准确判定故障性质的程 度,甚至引发误判,从而导致线路重合失败,对系统 运行的稳定性造成威胁。

针对上述问题,本文摒弃已有的以线路残余电 气量为依据的思路,借鉴文献[15-16]中"利用注入 信号判定故障性质"的思路,在利用放电间隙充分释 放线路残余能量的前提下,在线路一端接入预充电

收稿日期:2019-07-12;修回日期:2020-03-15 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877185) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877185) 电容器向线路放电,根据电容放电电压变化特性完成对线路故障性质的判定,并据此建立相应的自适应三相重合闸策略,基于PSCAD/EMTDC的仿真验证了该策略在不同工况下的正确性与可行性。

1 附加电容放电电压特性

1.1 附加器件接入方案

输电线路故障跳闸后,三相线路均失去外界电 源,线路中残余电气量存续的主要原因是并联电抗 器储存了若干电磁能量。然而,当并联电抗器中的 储能释放完毕后,线路残余电气量将不复存在。当 故障过渡电阻较大时,线路残余能量消耗速度亦会 较快,甚至在基于残余电气量的故障性质判据得出 判定结果之前,残余电气量即已衰减至无法精确测 量的程度。此种情况下,现有的基于残余电气量的 故障性质判据的准确性难以得到保证^[14]。

并联电抗器的存在增加了线路残余电气量的存 续性,但同时也增加了熄弧时间的不确定性。为解 决此问题,本文摒弃利用确定性不强的线路残余电 气量判定故障性质的思路,在线路一端接入附加器 件(单端带并补的线路,接入点位于无并补侧;双端 带并补的线路,接入点位于受端侧),经由放电间隙 释放线路残余能量后,由直流源预充电的电容C对 线路反复放电,根据其振荡放电电压特征,实现利用 低压器件判别高压线路故障性质。接入附加元件的 输电线路结构如图1所示。图中,L为补偿电感;K_d 为附加器件开关;K_c为电容开关;K_b为直流源开关; B为直流源。

为避免线路残余电压以及线路过电压反向击穿附加电容,在线路发生故障三相跳闸后,开关K_d闭合,释放并联电抗器存储的能量,故障性质判别结束后断开;经固定延时后,由直流源B对电容充电,Δt时间后断开开关K_b、合上开关K_c,将附加电容C投



图1 接入附加元件的输电线路结构

Fig.1 Structure of transmission line with additional components

入。为将并联电抗器中存储的能量快速释放完,在 放电间隙与接地点之间加装补偿电阻。为避免故障 发生在附加电容安装处时出现判定盲区,在电容开 关K_c与线路之间加装补偿电感L。为防止附加电容 与放电间隙构成放电回路,放电间隙的击穿电压设 为电容充电电压的1.5~2倍。

1.2 发生故障时电容放电的电压特性

1.2.1 发生接地故障时电容放电的电压特性

以单端带并联电抗器的输电线路发生A相接地 故障为例分析电容电压的变化规律。A相接地故障 等效电路如图2所示。图中, u_{c_A} 为附加电容 C_A 两端 电压,其初始值为 U_0 ; i_{c_A} 为 C_A 放电电流; $R_A=R_L+R_t$, R_L 为 C_A 安装处到故障点的线路电阻, R_t 为过渡电阻; $L_A=L_L+L$, L_L 为 C_A 安装处到故障点的线路等效电感。



图2 A相接地故障等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of phase A grounding fault

设开关 K_{c_A} 在t=0时刻闭合,根据基尔霍夫电压 定律(KVL),有以下关系成立^[17]:

$$\begin{cases} L_{A}C_{A}\frac{d^{2}u_{c_{A}}}{dt^{2}} + R_{A}C_{A}\frac{du_{c_{A}}}{dt} + u_{c_{A}} = 0 \\ u_{c_{A}} = U_{0} \end{cases}$$
(1)

当 $(R_A/2)^2 < L_A/C_A$ 时,电容放电电压 u_{c_A} 与频率 ω 如式(2)所示。

$$\begin{cases} u_{c_{\lambda}} = \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\alpha t} \sin\left(\omega t + \arctan\frac{\omega}{\alpha}\right) \\ \dots = \sqrt{\alpha^2 + \alpha^2} \end{cases}$$
(2)

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R_{\rm A}}{2L_{\rm A}} \\ \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_{\rm A}L_{\rm A}}} \end{cases}$$
(3)

发生两相接地故障、三相接地故障时的分析与

单相接地故障类似;双端带并联电抗器的输电线路 发生单相接地故障时,由于并联电抗器感抗值远大 于线路等效电阻以及过渡电阻,其等效电路与单端 带并联电抗器的输电线路类似。限于篇幅,针对上 述情况的分析不再赘述。

1.2.2 发生相间故障时电容放电的电压特性

图 3 为线路发生 AB 相间故障时的等效电路。 图中, x 为故障点与附加电容安装端处的距离占线路 全长的百分比; L_{LA}、L_{LB}分别为A、B 相线路等效电感; R_{LA}、R_{LB}分别为A、B 相线路等效电阻; L_{mA}、L_{mB}分别为 A、B 相并联电抗器等效电感。



图 3 AB 相间故障等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of phase-A-to-B short circuit fault

由于并联电抗器电感L_m远大于线路等效电感 L_{LA}以及补偿电感L,电抗远大于线路阻抗以及过渡 电阻,因此图3所示电路可简化为图4。



图4 图3的简化电路

Fig.4 Simplified circuit of Fig.3

由于A相、B相并联电抗器等效电感大小相同,则可得:

$$u_{L_{mA}} = u_{L_{mP}} \tag{4}$$

其中, $u_{L_{mA}}$ 、 $u_{L_{mB}}$ 分别为A、B相并联电抗器两端电压。

将式(4)代入图3中,可得:

$$\begin{cases} U_{C_{A}} \approx U_{C_{B}} \\ \omega_{A} \approx \omega_{B} \end{cases}$$
(5)

其中, $U_{c_{x}}$ 、 $U_{c_{s}}$ 分别为A、B相附加电容电压的幅值; ω_{x} 、 ω_{s} 分别为A、B相附加电容放电电压频率。

由此可知,存在相间故障时,故障相电容放电电 压幅值和频率几乎相同。

发生三相相间故障时的分析与两相相间故障类 似;双端带并联电抗器的输电线路发生相间故障时, 其等效电路与单端带并联电抗器的输电线路类似。 限于篇幅,针对上述情况的分析不再赘述。

1.3 故障消失后电容放电的电压特性

1.3.1 故障消失后单端带并联电抗器的输电线路电容放电的电压特性

图5为故障消失后,两端断路器未重合,并入三 相附加电容时的A相等效电路。图中,*C*₀为线路分 布电容; i_{c_0} 为流经分布电容的电流; i_L 为并联电抗器电流;u为附加电容安装处线路电压;设开关 K_{c_A} 在t=0时刻闭合,0+、0-分别表示开关闭合前、后。



图 5 故障消失后单端带并联电抗器的输电线路 并入附加电容时的 A 相等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of phase A of power transmission line with shunt reactors at single terminal, when additional capacitor is accessed after fault extinction

由于补偿电感远小于并联电抗器等效电感,为 简化计算可认为:

$$u \approx u_c$$
 (6)

根据图5所示电路,由基尔霍夫电流定律(KCL)可知:

$$i_{C_{A}} + i_{C_{0}} + i_{L} = 0 \tag{7}$$

$$\begin{cases} (L_{\rm m} + L_{\rm LA})(C_{\rm A} + C_{\rm 0}) \frac{\mathrm{d}^{2} i_{L}}{\mathrm{d} t^{2}} + R_{\rm LA}(C_{\rm A} + C_{\rm 0}) \frac{\mathrm{d} i_{\rm L}}{\mathrm{d} t} + i_{L} = 0\\ i_{L}(0+) = i_{L}(0-) = 0 \qquad (8)\\ \frac{\mathrm{d} i_{L}}{\mathrm{d} t} = \frac{U_{0}}{L_{\rm m} + L_{\rm LA}} \end{cases}$$

可得 i_L 、 u_c ,分别为如式(9)、(10)所示。

$$\begin{cases} i_{L}(t) = \frac{U_{0}}{\omega_{1}(L_{m} + L_{LA})} e^{-\alpha_{1}t} \sin(\omega_{1}t) \\ \omega_{1} = \sqrt{\alpha_{1}^{2} - \omega_{01}^{2}} \end{cases}$$
(9)

$$\begin{cases} u_{C_{A}} = \frac{\sqrt{\left[R_{LA} - \alpha_{1}\left(L_{m} + L_{LA}\right)\right]^{2} + \omega_{1}^{4}\left(L_{m} + L_{LA}\right)^{2}}}{\omega_{1}\left(L_{m} + L_{LA}\right)} U_{0} e^{-\alpha_{1}t} \times \\ sin\left[\omega_{1}t + \arctan\frac{\omega_{1}\left(L_{m} + L_{LA}\right)}{R_{LA} - \alpha_{1}\left(L_{m} + L_{LA}\right)}\right] \\ \omega_{1} = \sqrt{\alpha_{1}^{2} - \omega_{01}^{2}} \end{cases}$$
(10)

$$\begin{cases} \alpha_{1} = \frac{R_{LA}}{2(L_{LA} + L_{m})} \\ \omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{(C_{A} + C_{0})(L_{LA} + L_{m})}} \end{cases}$$
(11)

1.3.2 故障消失后双端带并联电抗器的输电线路电容放电的电压特性

图6为双端带并联电抗器的输电线路在无故障 时的A相等效电路。

$$\begin{cases} L_{\rm m} > L_{\rm LA} > L \\ X_{L_{\rm m}} \gg R_{\rm LA} > X_L \end{cases}$$
(12)



图6 故障消失后双端带并联电抗器的输电线路 并入附加电容时的A相等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of phase A of power transmission line with shunt reactors at both terminals, when additional capacitor is accessed after fault extinction

其中, X_{L_n} 和 X_L 分别为并联电抗器感抗值和补偿电感感抗值。由式(12)可得:

图7 图6的简化电路

Fig.7 Simplified circuit of Fig.6

根据图7,参考式(8)—(11)可以得出双端带并联 电抗器的输电线路在无故障时的电容放电电压为:

$$u_{C_{A}} = \frac{\sqrt{\left[R_{LA} - \alpha_{2}\left(L_{m} + L_{LA}\right)\right]^{2} + \omega_{2}^{4}\left(L_{m} + L_{LA}\right)^{2}}}{\omega_{1}\left(L_{m} + L_{LA}\right)} U_{0} e^{-\alpha_{2}t} \times \left[\sin\left[\omega_{2}t + \arctan\frac{\omega_{2}\left(L_{m} + L_{LA}\right)}{R_{LA} - \alpha_{1}\left(L_{m} + L_{LA}\right)}\right]\right]$$

$$\omega_{2} = \sqrt{\alpha_{2}^{2} - \omega_{02}^{2}}$$

$$\begin{cases} \alpha_{2} = \frac{K_{\text{LA}}}{L_{\text{LA}} + L_{\text{m}}} \\ \omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{2(C_{\text{A}} + C_{0})(L_{\text{LA}} + L_{\text{m}})}} \end{cases}$$
(15)

1.4 附加电容参数的选择

由上述分析可知,若电容参数选择恰当,则接地 故障发生前后的电容放电频率差异明显,即满足:

$$\begin{cases} \omega > \omega_{1}, \quad \omega > \omega_{2} \\ \left(\frac{R_{A}}{2}\right)^{2} < \frac{L_{A}}{C_{A}} \\ \left(\frac{R_{LA}}{2}\right)^{2} < \frac{L_{LA} + L_{m}}{C_{A} + C_{0}} \\ R_{LA}^{2} < \frac{L_{LA} + L_{m}}{2(C_{A} + C_{0})} \end{cases}$$
(16)

将式(2)、(3)、(10)、(11)代入式(16),可得单端 带并联电抗器的输电线路附加电容的选择依据为:

$$\begin{cases}
C_{A} < \frac{4L_{A}}{R_{A}^{2}} \\
C_{A} < \frac{4(L_{LA} + L_{m})}{R_{LA}^{2}} - C_{0} \\
C_{A} > \frac{K_{B} - K_{A}C_{0} + \sqrt{(K_{A}C_{0} - K_{B})^{2} + 4K_{A}K_{C}}}{2K_{A}}
\end{cases} (17)$$

即为:

$$\frac{K_{\rm B} - K_{\rm A}C_{\rm 0} + \sqrt{(K_{\rm A}C_{\rm 0} - K_{\rm B})^2 + 4K_{\rm A}K_{\rm C}}}{2K_{\rm A}} < C_{\rm A} < \frac{4L_{\rm A}}{R_{\rm A}^2} (18)$$

$$\begin{cases}
K_{\rm A} = \frac{R_{\rm A}^2 (L_{\rm LA} + L_{\rm m})^2 - L_{\rm A}^2 R_{\rm LA}^2}{4L_{\rm A} (L_{\rm LA} + L_{\rm m})}$$

$$K_{\rm B} = L_{\rm LA} + L_{\rm m} - L_{\rm A}$$

$$K_{\rm C} = (L_{\rm LA} + L_{\rm m})C_{\rm 0}$$
(19)

同理,将式(2)、(3)、(14)、(15)代入式(16)可得 双端带并联电抗器的输电线路附加电容的选取范 围为:

$$\frac{K_{\rm B1} - K_{\rm A1}C_0 + \sqrt{(K_{\rm A1}C_0 - K_{\rm B1})^2 + 4K_{\rm A1}K_{\rm C1}}}{2K_{\rm A1}} < C_{\rm A} < \frac{4L_{\rm A}}{R_{\rm A}^2} (20)$$

$$\begin{cases} K_{\rm A1} = \frac{R_{\rm A}^2 (L_{\rm LA} + L_{\rm m})^2 - 4L_{\rm A}^2 R_{\rm LA}^2}{4L_{\rm A} (L_{\rm LA} + L_{\rm m})} \\ K_{\rm B1} = 2L_{\rm LA} + 2L_{\rm m} - L_{\rm A} \\ K_{\rm C1} = 2(L_{\rm LA} + L_{\rm m})C_0 \end{cases}$$
(21)

根据式(11)和式(15)可知ω₁>ω₂,因此依据式 (20)进行附加电容的选择,即可同时满足单端、双端 带并联电抗器输电线路对附加电容大小的要求。

为使不接地故障消失前、后的电容放电频率有 差异,根据第1节的分析,在式(20)的基础上将各相 电容参数设为不同大小。为使该差异足够明显,本 文电容参数的设置须满足式(22)。

$$\begin{cases} C_{\min} \ge 20 \% C_{\max} \\ \Delta C_{\min} \ge 20 \% C_{\max} \end{cases}$$
(22)

其中, C_{\min} 为三相附加电容的最小值; C_{\max} 为三相附加 电容的最大值; ΔC_{\min} 为三相附加电容之间差值的最 小值。

2 基于电容放电电压特征的故障性质判据

2.1 数据处理

基于上述分析,考虑到故障消失前后,电容放电 电压频率存在较明显的差异(ω>ω₁,ω>ω₂),本文采 用低通滤波器对采集的电容电压信号进行处理,滤 除故障消失前频率较大的电压波形,保留故障消失 后频率较小的电压波形,使故障消失前、后电压特征 的对比更加明显。可依据图6所示的等效电路,通 过式(14)和式(15)确定滤波器截止频率的大小。

2.2 接地故障性质判据

电容放电电压信号经滤波器处理后,故障消失前的电容电压幅值几乎为0,故障消失后的电容电压幅值呈现明显的正弦波动的特征。基于此,本文将电容放电期间电压波形取绝对值后进行积分,根据积分结果判定故障性质,相应的故障性质判据如式(23)所示。

$$\int_{0}^{\Delta t} \left| u_{\varphi} \right| \mathrm{d}t > \xi \quad \varphi = \mathrm{A}, \mathrm{B}, \mathrm{C}$$
(23)

其中,u_φ为故障相电容器投入期间的放电电压;Δt的 设置需综合考虑线路参数、电容大小、充放电速度及 对应电压等级电网的继电保护装置运行整定规程规 定需考虑的最大过渡电阻值等因素;ξ为整定值,其 确定方法如式(24)所示。

$$\xi = KK_1 \int_0^{\Delta t} \left| u_{c_{\varphi}} \right| dt \quad \varphi = A, B, C$$
(24)

其中,K为放大系数; K_1 为可靠系数,其取值范围一般为 $0.3\sim0.5$; u_{c_s} 为无故障时 φ 相附加电容的放电电压。

2.3 非接地故障性质判据

低通滤波器的存在同样可以滤除由分布电容产 生的高次谐波。故障存在时,故障相电压波形重合, 故障消失后因各相附加电容的大小不同则有明显区 分。基于此,本文将附加电容投入期间电压波形取 绝对值后进行积分,根据故障相之间的电压积分差 值判别故障性质,判据如式(25)所示。

$$\int_{0}^{\omega} \left(\left| u_{\varphi_{1}} \right| - \left| u_{\varphi_{2}} \right| \right) \mathrm{d}t > \xi_{1}$$

$$(25)$$

其中,*u*_{φ1}、*u*_{φ2}为发生不接地故障时故障相附加电容 投入期间的电容放电电压;*ξ*₁为整定值,其确定方法 如式(26)所示。

$$\xi_1 = KK_1 \int_0^{\Delta t} \left(\left| u_{C_{\varphi^1}} \right| - \left| u_{C_{\varphi^2}} \right| \right) \mathrm{d} t \tag{26}$$

其中,*u_{c_e}、u_{c_e}*对应式(25)中各相附加电容在无故障时的放电电压。

3 输电线路自适应重合闸策略

根据上述分析,可制定本文所提带并联电抗器 输电线路自适应三相重合闸策略的流程图如附录A 中的图A1所示,流程具体如下。

(1)在t=0时线路发生故障,三相断路器跳闸。

(2)首先判断跳闸原因:若为偷跳,则大电源侧 经0.1 s^[18]延时后率先重合,小电源侧检同期后重合; 若是人为操作,则不重合;若非上述2种情况,则转 入步骤(3)。

(3)为避免线路残余电气量对附加电容以及判 定结果产生影响,在t=0.05s时接入放电间隙,直到 故障性质判别结束后断开。 (4)考虑线路暂态过程及经验熄弧时间,在t=
 0.3 s时直流源对电容充电0.1 s后断开K_b,t=0.5 s
 时^[19]投入三相附加电容,投入时长为Δt。

(5)投入附加电容期间,检测经低通滤波器滤波 后三相电容放电电压信号的积分值大小,若满足式 (23)或式(25)所示的故障性质判据,则判定故障性 质为暂时性且已消失,切除附加电容后,根据步骤 (2)进行线路重合,流程结束;否则判定故障依然存 在,转至步骤(6)。

(6)切除三相附加电容,经0.2 s延时(该延时内, 接入直流源对三相电容重新充电后切除直流源,充 电时长为0.1 s)后再次投入附加电容,投入时长依然 为Δt,返回步骤(5)进行循环判定。若在当地线路三 相重合闸整定动作时间t_{set}后,判定结果仍为"故障 依然存在",则判定故障为永久性,闭锁重合闸。

4 仿真结果与分析

本文以图 8、9 所示的 500 kV 带并联电抗器输电 线路为仿真算例,线路参数如附录 B 所示。为最大 限度地接近线路实际情况,基于 PSCAD / EMTDC 搭 建 500 kV 单端和双端带并联电抗器的输电线路分 布参数模型;补偿电感大小均为 0.001 H;使用低通 滤波器对所得电容放电电压波形进行处理,截止频 率为 35 Hz;故障发生时刻为 2.5 s,线路在 2.51 s 时 三相跳闸,故障熄弧时间为 3.2 s;根据 2.2 节所述附 加电容放电时间 Δt 的设置方法,取 Δt=0.1 s。



图 8 单端带并联电抗器的输电线路

Fig.8 Power transmission line with shunt reactors at single terminal



图 9 双端带并联电抗器的输电线路

Fig.9 Power transmission line with shunt reactors at both terminals

4.1 线路故障及故障消失后的电容放电电压特性

基于图 8、9 所示的仿真算例,令故障点位于线路中点处,故障类型分别设置为 A 相接地、AB 两相接地、三相接地、AB 两相短路、三相短路故障以及这些故障存在过渡电阻的情况。设置放电间隙击穿电

压为6 kV, 三相电容充电电压均为3 kV, A、B、C相附加电容大小分别为5、8、13 μF; 2.55 s时接入放电间隙, 3.05 s时第一次投入附加电容, 3.35 s时第二次投入附加电容, 投入时长均为0.1 s。由于故障时长为0.7 s, 所以在第二次投入附加电容时, 故障已经消失。

图 10 为单端带并联电抗器的输电线路中点发 生 A 相接地故障时的电容放电电压,图 11、12 分别 为单端带并联电抗器的输电线路中点发生 AB 相间 故障时的电容放电电压及其绝对值差值(图中,对 3.15~3.35 s间的波形进行了省略,后同)。单端带并 联电抗器的输电线路的其他仿真波形详见附录 C 中 的图 C1—C3。双端带并联电抗器的输电线路的仿 真波形见附录 C 中的图 C4—C8。

由图 10—12 可知,当发生单相金属性接地故障时,故障消失前后附加电容放电电压有明显的区别; 发生 AB 两相金属性故障时,故障存在时,两相电容 电压波形基本重合,当故障消失后,两相电压波形因



图 10 单端带并联电抗器的输电线路发生 A 相 接地故障时的 A 相电容放电电压

Fig.10 Discharging voltage of capacitors in phase A when phase A grounding fault occurs at power transmission line with shunt reactors at single terminal



图 11 单端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相间 短路故障时的两相电容放电电压

Fig.11 Discharging voltage of phases A and B capacitors when phase-A-to-B short circuit fault occurs at power transmission line with shunt reactors at single terminal



图 12 单端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相间短路 故障时的电容放电电压绝对值差值

Fig.12 Absolute value difference of discharging voltages of phases A and B capacitors when phase-A-to-B short circuit fault occurs at power transmission line with shunt reactors at single terminal

附加电容大小的区别产生明显差别,且不受过渡电阻的影响,这验证了第1节理论分析的正确性。

4.2 判据验证

令故障位置分别为x=0,50%,100%;过渡电阻 $分别为<math>0,100,200\Omega;根据式(24),(26),设定K=$ $1000,K_1=0.5,单端、双端带并联电抗器的输电线路$ 的接地故障整定值分别为<math>65,90,相间故障整定值 均为20。分别验证上述情况下,本文所提熄弧判据 的正确性。单端带并联电抗器的输电线路发生A相 接地、AB相间短路故障的验证结果分别如表1,2所 示,其他故障的验证结果见附录C中的表C1—C3。 双端带并联电抗器的输电线路的仿真结果见附录C 中的表C4—C8。

由表1、2可知,发生接地故障时,故障消失前后 故障相的电容放电电压的积分值有明显的区别;发 生相间短路故障时,故障相之间的电压积分差值在 故障消失前后有很大差别,依据式(23)、(25)能够可

表1 单端带并联电抗器的输电线路发生A相接地故障时 本文判据验证结果

Table 1Verification results of proposed criteria whenphase A grounding fault occurs at power transmissionline with shunt reactors at single terminal

		故障存	存在	故障消	肖失	- 判守	
x / %	$R_{\rm t}$ / Ω	$\int_{0}^{\Delta t} \left u_{\rm A} \right {\rm d} t$	故障 性质	$\int_{0}^{\Delta t} \left u_{C_{\mathrm{A}}} \right \mathrm{d}t$	故障 性质	判定 时长∕s	
	0	25.20	永久性	79.93	瞬时性	0.95	
0	100	24.60	永久性	80.08	瞬时性	0.95	
	200	27.22	永久性	78.82	瞬时性	0.95	
	0	17.90	永久性	78.49	瞬时性	0.95	
50	100	20.04	永久性	79.72	瞬时性	0.95	
	200	22.97	永久性	80.82	瞬时性	0.95	
	0	14.36	永久性	90.93	瞬时性	0.95	
100	100	17.57	永久性	78.08	瞬时性	0.95	
	200	20.20	永久性	79.30	瞬时性	0.95	

表 2 单端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相间短路 故障时本文判据验证结果

Table 2 Verification results of proposed criteria when phase A-to-B short circuit fault occurs at power transmission line with shunt reactors at single terminal

		故障	存在	故障	消失	判定	
x / %	$R_{\rm t}$ / Ω	$\int_0^{\Delta t} \Delta_1 \mathrm{d} t$	故障 性质	$\int_0^{\Delta t} \Delta_2 \mathrm{d} t$	故障 性质	判定 时长∕s	
0	0	0.60	永久性	29.64	瞬时性	0.95	
	100	1.64	永久性	37.30	瞬时性	0.95	
	200	2.77	永久性	36.68	瞬时性	0.95	
	0	0.10	永久性	33.46	瞬时性	0.95	
50	100	1.30	永久性	36.60	瞬时性	0.95	
	200	2.40	永久性	36.37	瞬时性	0.95	
	0	0.08	永久性	43.55	瞬时性	0.95	
100	100	0.95	永久性	36.44	瞬时性	0.95	
	200	0.95	永久性	36.44	瞬时性	0.95	
	1 1						

注: $\Delta_1 = |u_{\varphi_1}| - |u_{\varphi_2}|, \Delta_2 = |u_{C_{\varphi_1}}| - |u_{C_{\varphi_2}}|, 后同。$

靠判别输电线路故障性质,且不受故障位置以及过 渡电阻的影响;并且,当故障为瞬时性时输电线路能 够快速成功重合,故障为永久性时输电线路能够可 靠不重合,成功避免了输电线路重合于尚未消失的 瞬时性故障或永久性故障。

5 结论

本文提出了一种基于电容电压的输电线路自适 应三相重合闸策略,所得结论如下:

(1)本文由附加电容的放电电压特性,求解电压 积分值,利用求解值与实际值的差异判别故障性质;

(2)经过仿真验证,本文所提方法适用于单端和 双端带并联电抗器的输电线路在各种故障情况下的 自适应三相重合闸,且不受故障位置和过渡电阻的 影响;

(3)本文所提策略需在线路上加装放电间隙、电容、蓄电池、补偿电感电阻以及相应的开关,具有成本较高的缺点,主要集中于高压断路器的成本,随着断路器制造工艺的日益成熟,本文所提策略的适用 性会越来越好。

本文所提策略虽经过理论分析和仿真验证,但 仍需进行实体实验,进一步验证其可行性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 [1]张德泉,罗深增,李银红.长距离输电线路中间带并联电抗器的双端非同步故障定位算法[J].电力自动化设备,2016,36 (11):127-132.

ZHANG Dequan, LUO Shenzeng, LI Yinhong. Dual-terminal asynchronous fault location algorithm for long transmission line with shunt reactor in middle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 127-132.

[2] 邵文权,南树功,章霄微,等.带并补电抗器超/特高压输电线

路单相瞬时故障拍频特性研究[J]. 电力自动化设备,2014,34 (5):72-78.

SHAO Wenquan, NAN Shugong, ZHANG Xiaowei, et al. Beatfrequency characteristics for single-phase transient fault of EHV/UHV transmission line with shunt reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):72-78.

[3] 张云柯,李博通,贾健飞,等.带并联电抗器的超高压电缆-架 空混合线路三相永久性故障识别方法[J].电力自动化设备, 2017,37(10):107-111,125.

ZHANG Yunke, LI Botong, JIA Jianfei, et al. Three-phase permanent fault identification for EHV cable-overhead hybrid line with shunt reactors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):107-111, 125.

- [4] 宋国兵,索南加乐,孙丹丹. 输电线路永久性故障判别方法综述[J]. 电网技术,2006,30(18):75-80.
 SONG Guobing,SUONAN Jiale,SUN Dandan. A survey on methods to distinguish permanent faults from instantaneous faults in transmission lines[J]. Power System Technology,2006, 30(18):75-80.
- [5] 葛耀中,肖原. 超高压输电线自适应三相自动重合闸[J]. 电 力自动化设备,1995,15(2):10-18.
- [6] 李永丽,李博通.带并联电抗器输电线路三相永久性和瞬时性 故障的判别方法[J].中国电机工程学报,2010,30(1):82-90.
 LI Yongli,LI Botong. Identification of three-phase permanent or temporary fault at transmission lines with shunt reactors
 [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(1):82-90.
- [7]梁振锋,索南加乐,康小宁,等.利用自由振荡频率识别的三相 重合闸永久性故障判别[J].中国电机工程学报,2013,33(7): 124-130.

LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, et al. Permanent faults identification using free oscillation frequency for three-phase reclosure on transmission lines with shunt reactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7):124-130.

[8]梁振锋,索南加乐,康小宁,等.利用最小二乘拟合算法的三相 重合闸永久性故障判别[J].西安交通大学学报,2013,47(6): 85-89,96.

LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, et al. Permanent faults identification using least squares fitting algorithm for three-phase reclosure in transmission lines with shunt reactors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6):85-89,96.

 [9]梁振锋,索南加乐,宋国兵.基于电流差动的双端带并联电抗 器输电线路三相重合闸永久性故障判别[J].电网技术,2011, 35(6):183-187.
 LIANG Zhenfeng,SUONAN Jiale,SONG Guobing. Differential

current-based identification of permanent faults for threephase autoreclosure on transmission line with shunt reactors at both ends[J]. Power System Technology,2011,35(6):183-187.

[10] 王庆庆,王慧芳,林达,等. 基于并联电抗器差模电流波形特征 的三相自适应重合闸永久性故障识别[J]. 电网技术,2015,39 (4):1127-1132.

WANG Qingqing, WANG Huifang, LIN Da, et al. Identification of permanent faults for three-phase adaptive reclosure based on waveform characteristics of differential mode current in shunt reactors[J]. Power System Technology, 2015, 39(4):1127-1132.

[11] 邵文权,宋国兵,索南加乐,等.带并联电抗器输电线路三相自 适应重合闸永久性故障判别[J].中国电机工程学报,2010,30 (4):91-98. SHAO Wenquan, SONG Guobing, SUONAN Jiale, et al. Identification of permanent faults for three-phase adaptive reclosure of the transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4):91-98.

 [12] 索南加乐,梁振锋,宋国兵.采用模量参数识别的三相重合闸 永久性故障判别原理[J].中国电机工程学报,2010,30(25): 81-86.
 SUONAN Jiale,LIANG Zhenfeng,SONG Guobing. Permanent

faults identification based on mode component for three-phase autoreclosing on transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):81-86.

- [13] 梁振锋,索南加乐,宋国兵,等. 基于模量电容参数识别的永久 性故障判别方法[J]. 高电压技术,2011,37(4):916-922.
 LIANG Zhenfeng,SUONAN Jiale,SONG Guobing, et al. Permanent faults identification method for three-phase autoreclosing based on capacitance parameter[J]. High Voltage Engineering, 2011,37(4):916-922.
- [14] 梁振锋,索南加乐,宋国兵,等. 基于模型识别的三相重合闸永 久性故障判别[J]. 电力系统自动化,2010,34(8):81-85.
 LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Discrimination of permanent faults for three-phase autoreclosing based on model identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(8):81-85.
- [15] 李永丽,李斌,黄强,等. 基于高频保护通道信号的三相自适应 重合闸方法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):74-79.
 LI Yongli, LI Bin, HUANG Qiang, et al. The study on threephase adaptive reclosure based on carrier channel and signal transmission[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(7):74-79.
- [16] 解超,李凤婷,路亮,等.不带并联电抗器的风电场单回送出线 自适应三相重合闸策略[J]. 电网技术,2017,41(11):3492-3498.
 XIE Chao,LI Fengting,LU Liang, et al. An adaptive threephase reclosing scheme for wind farm single circuit outgoing line without shunt reactors[J]. Power System Technology,2017,

41(11):3492-3498. [17] 孙玉坤,陈晓平. 电路原理[M]. 北京:机械工业出版社,2006:

- [18] 索南加乐,梁振锋,宋国兵. 自适应熄弧时刻的单相重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):37-41.
 SUONAN Jiale,LIANG Zhenfeng,SONG Guobing. Study of single-phase reclosure with adaptive secondary arc extinction[J].
 Power System Protection and Control,2012,40(5):37-41.
- [19] 刘培,杨军,陶丁涛. 一种输电线路瞬时故障最佳重合闸时刻 实用计算方法[J]. 电网技术,2013,37(3):635-640.
 LIU Pei,YANG Jun,TAO Dingtao. Practical online calculation of optimal reclosing time for transmission line under transient fauht[J]. Power System Technology,2013,37(3):635-640.

作者简介:

102-137.



黄 飞(1994—),男,新疆沙湾人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统继电 保护(E-mail:1357628606@qq.com);

李凤婷(1965—), 女, 新疆乌鲁木齐 人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向 为电力系统继电保护、可再生能源并网技 术及电力系统调度控制(**E-mail**: xjlft2009@ sina.com)。

(编辑 任思思)

(下转第197页 continued on page 197)

(1):77-83.

[22] 薛金花,叶季蕾,陶琼,等.基于多场景的商业园区源-储-荷系 统运营模式及投资决策研究[J].电力自动化设备,2019,39 (2):78-83,92.

XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Multi-scenarios based operation mode and investment decision of source-storageload system in business park[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):78-83,92.

作者简介:



邬明亮(1992—),男,浙江杭州人,硕
 士,主要研究方向为光伏储能技术(E-mail:
 leckiewu@foxmail.com)。

(编辑 王欣竹)

Economy of energy storage in electrified railway under time-of-use price policy WU Mingliang

(Construction Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Under time-of-use price policy, energy storage is especially suitable for the user side with higher electricity price, such as industry and commercial users. The electrified railway generates a large amount of braking energy which cannot be measured in reverse. There is no marginal cost to recycle this part of energy through energy storage, which can improve the economy of energy storage. Based on lithium battery energy storage and the characteristics of traction load, the feasibility of energy storage scheme in electrified railway is analyzed. Considering the characteristics of lithium battery energy storage system, the economic model of electrified railway energy storage is established. With financial internal rate of return and net annual value as evaluation indexes, the investment value of energy storage in electrified railway is analyzed. The results show that the energy storage in electrified railway had good investment value through rational configuration. Moreover, it is necessary to make a comprehensive decision on the investment of energy storage in electrified railwayby combining capital, loan interest rate, loan time and other factors.

Key words: time-of-use price; electrified railway; energy storage; railway power conditioner; financial internal rate of return; net annual value

(上接第176页 continued from page 176)

Adaptive three-phase auto-reclosing strategy based on capacitor voltage for power transmission lines with shunt reactors

HUANG Fei¹, LI Fengting¹, XIE Chao¹, WANG Ting^{1,2}, MA Hongtao², BAI Haibin²

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology,

Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Changji Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: Energy storage feature of shunt reactors can increase the uncertainty of secondary arc duration after three-phase tripping, especially for the faults with high transition resistance, the residual electrical quantities usually damp too rapidly to ensure reliability of the existing fault characteristic criteria, and even result in a reclosing failure. In view of the above problems, the pre-charged capacitors are used to discharge to the power transmission lines instead of the idea based on the residual electrical quantities of the line, the type of line fault is judged by the varying characteristics of capacitor discharging voltage. Simulations based on PSCAD / EMTDC verify that the proposed adaptive three-phase auto-reclosing strategy can guarantee its accuracy under various working conditions with different fault types, fault locations and transition resistances.

Key words: shunt reactor; distributed capacitance; fault with high transition resistance; pre-charged capacitor; three-phase auto-reclosing strategy

附录 A



图 A1 带并联电抗器输电线路自适应三相重合闸流程

Fig.A1 Flowchart of adaptive three-phase reclosing scheme of transmission lines with shunt reactors

附录 B

图 8 所示的单端带并联电抗器的输电线路参数为: r_1 =0.027 Ω /km, r_0 =0.1975 Ω /km; l_1 =0.965mH/km; l_0 =2.21mH/km; c_1 =0.0136 μ F/km; c_0 =0.0092 μ F/km; 线路全长 358km; 带并 补电抗器电抗 X_L =1900 Ω ; 中性点小电抗 X_N =475 Ω ; 电抗器电感 L_{M1} =5H, 中性点小电抗电 感 L_{M0} =0.51H。

图 9 所示的双端带并联电抗器输电线路线路参数为: r_1 =0.0195 Ω /km; r_0 =0.1675 Ω /km; l_1 =0.9134mH/km; l_0 =2.719mH/km; c_1 =0.04 μ F/km; c_0 =0.00834 μ F/km, 线路全长为 358km; 带并补电抗器电抗 X_L =1900 Ω ; 中性点小电抗 X_N =475 Ω ; 电抗器电感 L_{M1} = L_{N1} =5H, 中性点 小电抗电感 L_{M0} = L_{N0} =0.51H。

附录 C



图 C1 单端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相接地故障时 A、B 相的电容放电电压

Fig.C1 Discharging voltages of capacitors in phase A and B when phase A and B grounding fault occurs at power transmission



line with shunt reactors at single terminal

图 C2 单端带并联电抗器的输电线路发生 ABC 相接地故障时的电容放电电压

Fig.C2 Discharging voltages of capacitors of three phases when three phase grounding fault occurs at power transmission line





Fig.C3 Discharging voltages of capacitors of three phases when three phase short circuit fault occurs at power transmission line

with shunt reactors at single terminal



图 C4 双端带并联电抗器的输电线路发生 A 相接地故障时的 A 相电容放电电压

Fig.C4 Discharging voltage of capacitors in phase A when phase A grounding fault occurs at power transmission line with





图 C5 单端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相间短路故障时的两相电容放电电压

Fig.C5 Discharging voltage of phases A and B capacitors when phase-A-to-B short circuit fault occurs at power

transmission line with shunt reactors at both terminals



图 C6 双端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相接地故障时 A、B 相的电容放电电压

Fig.C6 Discharging voltages of capacitors in phase A and B when phase A and B grounding fault occurs at power

transmission line with shunt reactors at both terminals



图 C7 双端带并联电抗器的输电线路发生三相接地故障时的电容放电电压

Fig.C7 Discharging voltages of capacitors of three phases when three phase grounding fault occurs at power transmission



line with shunt reactors at both terminals

图 C8 双端带并联电抗器的输电线路发生 ABC 相间短路故障时的电容放电电压

Fig.C8 Discharging voltages of capacitors of three phases when three phase short circuit fault occurs at power transmission line with shunt reactors at both terminals

表 C1 单端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相接地故障时故障时本文判据验证结果

TableC1 Verification results of proposed criteria when phase A and B grounding fault occurs at power transmission line

		故障存在 $\int_0^{\Delta t} \left u_{\varphi} \right \mathrm{d}t$			故障	消失	•	和宁
x	$R_{\rm t}/\Omega$			故障性质	$\int_0^{\Delta t} \left u_{C_{\varphi}} \right \mathrm{d}t$		故障 性质	 利定 时长
		A 相	B 相		A 相	B 相		/8
	0	20.4	22.6	永久性	82.7	107.9	瞬时性	0.95
0	100	23.1	24.6	永久性	95.1	125.3	瞬时性	0.95
	200	29.7	34.3	永久性	96.9	126.7	瞬时性	0.95
	0	17.7	18.0	永久性	83.8	114.5	瞬时性	0.95
50%	100	18.4	18.6	永久性	95.3	124.9	瞬时性	0.95
	200	20.6	22.7	永久性	96.0	126.6	瞬时性	0.95
	0	14.4	14.9	永久性	74.3	119.4	瞬时性	0.95
100%	100	16.7	17.2	永久性	95.0	125.0	瞬时性	0.95
	200	18.7	20.9	永久性	96.2	125.3	瞬时性	0.95

with shunt reactors at single terminal

表 C2 单端带并联电抗器的输电线路发生三相接地故障时本文判据验证结果

TableC2 Verification results of proposed criteria when three phase grounding fault occurs at power transmission line with

	shunt reactors at single terminal													
		討	故障存在			故	(障消)	夫		和中				
x	$R_{\rm t}/\Omega$	$\int_0^{\Delta t} \left u_{\varphi} \right \mathrm{d}t$			故障性 质	ſ	$\int_{0}^{\Delta t} \left u_{C_{\varphi}} \right d$	t	故障 性质	判定 时长				
		A 相	B 相	C 相		A 相	B 相	C 相		/3				
	0	24.93	27.41	30.63	永久性	81.81	120.6	137.9	瞬时性	0.95				
0	100	22.26	22.73	27.17	永久性	82.16	118.5	144.3	瞬时性	0.95				
	200	21.65	24.45	29.61	永久性	83.16	118.8	144.4	瞬时性	0.95				
	0	19.95	21.16	22.62	永久性	84.84	120.9	140.1	瞬时性	0.95				
50	100	16.28	16.56	19.22	永久性	82.34	118.3	144.1	瞬时性	0.95				
	200	17.96	20.55	25.42	永久性	83.41	118.6	144.3	瞬时性	0.95				
	0	14.52	15.05	15.66	永久性	95.56	119.5	145.2	瞬时性	0.95				
100	100	15.49	15.98	17.92	永久性	82.70	118.2	143.9	瞬时性	0.95				
	200	16.99	19.27	23.48	永久性	83.77	118.5	144.1	瞬时性	0.95				

表 C3 单端带并联电抗器的输电线路发生 ABC 相间短路故障时本文判据验证结果

TableC3 Verification results of proposed criteria when three phase short circuit fault occurs at power transmission line

	with shunt reactors at single terminal													
		古	故障存在			古	 b 简 //	失		和宁				
x	R_t/Ω	$\int_0^{\Delta t} \Delta_{\mathbf{I}} \mathrm{d}t$			故障性 质		$\int_0^{\Delta t} \Delta_2 \mathrm{d}t$			判定 时长				
		AB	BC	AC		AB	BC	AC		/8				
	0	0.41	0.67	0.26	永久性	39.00	37.05	56.04	瞬时性	0.95				
0	100	2.85	2.25	3.41	永久性	36.16	33.82	59.97	瞬时性	0.95				
	200	2.66	3.83	4.50	永久性	35.72	33.81	59.53	瞬时性	0.95				
	0	0.04	1.23	1.27	永久性	36.12	39.11	55.22	瞬时性	0.95				
50	100	2.72	2.96	3.24	永久性	35.50	33.64	59.14	瞬时性	0.95				
	200	2.40	3.79	4.19	永久性	35.27	33.81	59.08	瞬时性	0.95				
	0	0.08	0.06	0.14	永久性	23.88	35.70	49.58	瞬时性	0.95				
100	100	0.99	0.90	1.90	永久性	34.98	33.21	58.18	瞬时性	0.95				
	200	0.41	1.81	3.94	永久性	39.00	33.38	58.03	瞬时性	0.95				

表 C4 双端带并联电抗器的输电线路发生 A 相接地故障时本文判据验证结果 Table C4 Verification results of proposed criteria when phase A grounding fault occurs at power transmission line with

shand reactors at both terminuts											
		故障存在		故障消失	 齿 陪	判定					
x	$R_{\rm t}/\Omega$	$\int_0^{\Delta t} u_{\rm A} {\rm d}t$	故障性质	$\int_0^{\Delta t} \left u_{C_{\rm A}} \right \mathrm{d}t$	世质	时长 /s					
	0	47.11	永久性	133.08	瞬时性	0.95					
0	100	42.95	永久性	137.43	瞬时性	0.95					
	200	46.63	永久性	133.17	瞬时性	0.95					
	0	40.20	永久性	128.76	瞬时性	0.95					
50	100	37.58	永久性	134.86	瞬时性	0.95					
	200	41.71	永久性	121.40	瞬时性	0.95					
	0	30.25	永久性	122.59	瞬时性	0.95					
100	100	33.79	永久性	134.40	瞬时性	0.95					
	200	38.31	永久性	127.93	瞬时性	0.95					

shunt reactors at both terminals

表 C5 双端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相接地故障时故障时本文判据验证结果

TableC5 Verification results of proposed criteria when phase A and B grounding fault occurs at power transmission line

		<u>故障存在</u> $\int_0^{\Delta t} u_{\varphi} dt$			故障	消失		생태관
x	$R_{\rm t}/\Omega$			故障性质	$\int_0^{\Delta t} \left u_{C_{\varphi}} \right dt$		故障 性质	利足时长
		A 相	B 相	-	A 相	B 相		/8
0	0	42.62	46.62	永久性	119.3	158.8	瞬时性	0.95
	100	40.00	43.10	永久性	110.2	165.8	瞬时性	0.95
	200	41.68	46.71	永久性	110.5	165.6	瞬时性	0.95
	0	46.40	42.88	永久性	114.4	125.5	瞬时性	0.95
50	100	35.16	38.03	永久性	110.7	165.2	瞬时性	0.95
	200	37.67	42.46	永久性	110.1	164.7	瞬时性	0.95
	0	30.18	30.89	永久性	112.3	123.6	瞬时性	0.95
100	100	32.22	35.10	永久性	111.7	163.2	瞬时性	0.95
	200	35.04	39.84	永久性	110.0	163.5	瞬时性	0.95

表 C6 双端带并联电抗器的输电线路发生三相接地故障时本文判据验证结果

TableC6 Verification results of proposed criteria when three phase grounding fault occurs at power transmission line with

	$R_{\rm t}/\Omega$	故障存在		討	(障消)	夫		和목	
x		$\int_0^{\Delta t} \left u_{\varphi} \right \mathrm{d}t$		故障性 质	\int_{0}^{1}	$ u_{C_{\varphi}} $	1 <i>t</i>	故障 性质	时
		A相 B相	C 相		A 相	B 相	C 相		/8
	0	38.83 41.26	43.94	永久性	119.6	155.6	175.1	瞬时性	0.9
0	100	38.46 41.45	44.48	永久性	113.6	156.9	176.2	瞬时性	0.9
	200	40.06 43.78	47.39	永久性	114.9	157.7	175.8	瞬时性	0.9
	0	33.37 34.81	35.59	永久性	116.0	154.7	175.6	瞬时性	0.9
50	100	34.12 36.58	38.86	永久性	113.3	156.4	176.8	瞬时性	0.9
	200	36.33 40.03	43.26	永久性	114.7	157.3	176.1	瞬时性	0.9
	0	30.18 30.88	31.09	永久性	119.7	122.8	163.4	瞬时性	0.9
100	100	31.82 34.44	35.96	永久性	113.6	156.0	177.1	瞬时性	0.9
	200	34.07 38.24	40.65	永久性	114.9	157.3	176.2	瞬时性	0.9

表 C7 双端带并联电抗器的输电线路发生 AB 相间短路故障时本文判据验证结果

TableC7 Verification results of proposed criteria when phase-A-to-B short circuit fault occurs at power transmission line

	with shunt reactors at both terminals												
x	$R_{\rm t}/\Omega$	故障存在 $\int^{\Delta t} A dt$	故障性质	故障消失 $\int^{\Delta} \Delta dt$	- 故障 性质	判定 时长							
	0	<u>J₀</u> <u>Д</u> 1 3.00	永久性	63.80	瞬时性	/s 0.95							
0	100	3.20	永久性	79.53	瞬时性	0.95							
	200	3.98	永久性	77.70	瞬时性	0.95							
	0	1.11	永久性	50.97	瞬时性	0.95							
50	100	2.21	永久性	80.87	瞬时性	0.95							
	200	2.84	永久性	76.96	瞬时性	0.95							
	0	0.80	永久性	34.32	瞬时性	0.95							
100	100	1.24	永久性	79.61	瞬时性	0.95							
	200	1.73	永久性	76.62	臟时性	0.95							

TableC8 Verification results of proposed criteria when three phase short circuit fault occurs at power transmission line

		故障存在 $\int_0^{\Delta t} \Delta_t dt$			故障性 质	赵	 位 障 消 (失		和守			
x	R_t/Ω						$\int_{0}^{\Delta t} \Delta_2 d$	t	故障 性质	时长			
		AB	BC	AC		AB	BC	AC		/s			
	0	1.34	2.66	1.33	永久性	34.06	32.47	66.53	瞬时性	0.95			
0	100	1.34	1.67	2.01	永久性	30.36	35.67	66.03	瞬时性	0.95			
	200	2.65	1.95	3.61	永久性	26.06	29.03	55.09	瞬时性	0.95			
	0	2.12	2.53	0.41	永久性	31.93	31.75	63.68	瞬时性	0.95			
50	100	2.52	2.26	2.78	永久性	29.64	28.95	58.59	瞬时性	0.95			
	200	0.68	3.15	3.83	永久性	26.24	30.12	56.36	瞬时性	0.95			
	0	0.59	0.41	1.00	永久性	33.81	31.95	65.76	瞬时性	0.95			
100	100	0.93	0.97	1.90	永久性	26.94	33.58	60.51	瞬时性	0.95			
	200	1.74	1.38	3.12	永久性	27.45	31.16	58.61	瞬时性	0.95			

with shunt reactors at both terminals