

新型同杆双回线自适应重合闸方案研究

朱建红¹, 陈福锋¹, 魏 曜¹, 陈 伟¹, 宋国斌², 郭效军¹, 马文龙¹

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003;

2. 西安交通大学 电力系, 陕西 西安 710049)

摘要: 提出了新的可用于同杆并架双回线的自适应重合闸方案, 并在此基础上给出了新的同杆并架双回线保护配置方案。对于带并联补偿电抗器的输电线路发生瞬时性故障后断开相电压存在拍频现象, 电压频率基本为低频分量; 发生永久性故障后, 断开相电压主要为健全相感应电压, 为工频分量。对故障相恢复电压进行步长为 20 ms 的差分, 瞬时性故障时差分后的电压幅值较大, 而永久性故障差分后电压幅值基本为零。通过比较差分电压的幅值, 能很好地区分瞬时和永久性故障。另外, 从可靠性出发, 提出了幅值判据和相位判据相结合的方案, 综合利用了幅值判据和相位判据的优势。新的幅值和相位相结合的判据, 能够很好地适用于不带并联电抗器的线路, 一端或者两端带并联电抗器的线路。大量 EMTP 和 RTDS 数字仿真实验表明该方案具有很强的可行性和工程应用价值。

关键词: 自适应重合闸; 同杆双回线; 幅值相位判据; 并联电抗器; EMTP 仿真

中图分类号: TM 762.2+6

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0047-05

0 引言

自动重合闸是保证电力系统安全供电的重要举措, 在国内外超高压电力系统中得到了广泛的应用。统计结果显示: 在线路故障中有 80% 以上都是瞬时性故障。瞬时性故障重合闸正确动作可以避免不必要的停电, 给工农业生产提供可靠的电力供应。但若是重合于永久性故障, 将会给系统和电力设备带来极大的危害。若能准确区分瞬时性故障和永久性故障, 就可避免重合到永久性故障, 对系统稳定、电力设备的安全都是大有裨益的。由于同杆双回线占用出线走廊窄, 送电容量大, 具有很高的经济价值, 在超高压电力系统中得到了越来越广泛的应用。同杆双回线自适应重合闸装置的研究已成为迫切的课题。在此提出了新的用于判别瞬时性故障和永久性故障的方案, 并针对此方案提出了新的双回线保护配置方案。

1 国内外研究现状

为区分瞬时性故障与永久性故障, 解决盲目重合闸问题, 国内外专家学者做了大量的研究工作, 提出了许多自适应重合闸的方法。概括起来主要有 3 种。

a. 电压判据^[1-2], 该方法主要利用故障相发生瞬时故障时存在电容耦合电压而永久性故障时则不存在该电压 2 种情况电压幅值差异较大的特性来区分的。它的主要问题在于灵敏度低, 耐过渡电阻能力较差, 实用线路长度有限制, 且受运行方式的影响。

b. 基于断开相谐波信号分析判别瞬时性故障和永久性故障的方法^[3-5], 该方法利用了电弧的数学模型, 实现起来比较困难。

c. 人工神经网络(ANN)技术^[6], 用 ANN 技术判别瞬时性故障和永久性故障计算精度高, 但由于训练神经网络计算量大, 实现复杂, 难以满足保护快速性要求。

同杆双回线由于两回线之间距离很近, 容易出现跨线故障, 为提高重合闸的成功率, 日本主干系统多采用按相重合闸^[7-8]方式, 但这种重合方式有可能合于永久性多相故障, 在我国基本上是不允许的^[9]。

现提出基于端电压幅值、相位的判据, 综合电压幅值判据和相位判据各自的优点, 取得了很好的效果。对于有并联电抗器的输电线路, 提出新的幅值和相位判据, 两者与门输出。该方法能有效区分瞬时性故障和永久性故障, 将该判据用于同杆双回线的自动重合闸, 具有很好的适用性。

2 新的重合闸方案研究

下面介绍重合方案。

a. 单相故障跳单相, 瞬时性故障重合; 永久性故障不重合。

b. 单线或者跨线两相接地故障, 跳开两相, 进行瞬时、永久故障判别, 若为瞬时性故障则重合其中的任一相, 合上后再利用单相故障的方法判别跳开的另一相是否为永久故障; 若为永久故障跳开本线三相。

c. 单线相间或者跨线两相不接地故障, 只跳开其中一相, 利用单相故障的判据判别另一相是否存在永久性故障。

d. 对于跨线多相故障,原则同上,同时还具有:同名相优先重合且可以同时重合;多相故障的线路优先重合;超前相优先重合。

下面介绍瞬时性故障和永久性故障的判别。

2.1 不带并联补偿电抗器线路

2.1.1 传统的幅值和相位判据

a. 电压幅值判据。永久性故障时线路对地电容放电,稳态情况下可以不考虑由电容产生的感应电压分量,断开相端电压仅由互感电压 U_x 决定。发生瞬时性故障,故障跳开相电压由电容耦合电压 U_y 和电磁感应电压 U_x 2 部分组成。由于 U_y 一般远大于 U_x ,在瞬时性故障情况下端电压要比永久性故障高很多。这就是电压幅值判据的基础。电压 U_x 和 U_y 可分别由式(1)和式(2)计算得到^[10]:

$$U_x = Z_m l \sum I_{jq} \quad (1)$$

$$U_y = \frac{jX_0}{jX_m + 2jX_0} \sum U_{jq} \quad (2)$$

式中 Z_m 为线路单位长度上的相间互感; l 为保护安装处到故障点之间的距离; $\sum I_{jq}$ 为健全相电流和; $\sum U_{jq}$ 为健全相电压和。

若

$$U_L > U_{zd} \quad (3)$$

则判为瞬时性故障,否则为永久性故障。其中, U_L 为端电压, U_{zd} 为电压门槛。

b. 电压相位判据。由于瞬时性故障跳开相电压基本为电容感应电压 U_y ,从式(2)又可看出 U_y 与正常相电压之和同相,因此,发生瞬时性故障后断开相端电压相位与正常相电压之和基本同相^[11];永久性故障断开相端电压仅由电磁感应电压 U_x 决定,从图 1 可看出 U_x 与正常相电压之和之间的相差近似 90° 。这就是所提相位判据的依据。

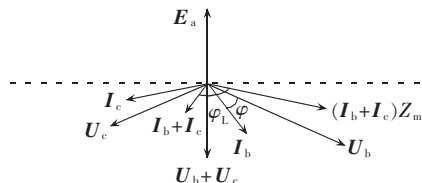


图 1 永久性故障断开相端电压
Fig.1 Terminal voltage of broken phase with permanent fault

$$\alpha = \angle \left(\frac{\sum U_{jq}}{U_f} \right) \quad (4)$$

式中 $\sum U_{jq}$ 为健全相电压之和; U_f 为故障相端电压; $\angle$ 表示取相位。

若

$$|\alpha| < \alpha_{zd} \quad (5)$$

则判为瞬时性故障,否则为永久性故障。其中 α_{zd} 可整定为 20° 左右。

2.1.2 新的端电压幅值相位判据

前面已经提及幅值判据受线路长度和过渡电阻的影响,在长线和大过渡电阻的情况下有可能误判。

相位判据在大多情况都是有效的,但在故障相恢复电压很低的情况下则有可能由于电压互感器精度的下降和计算误差引起误判。就此提出了新的方法,综合幅值判据和相位判据各自的优势形成新的幅值、相位判据:

若

$$U_L > 5 \text{ V} \quad (6)$$

判为瞬时性故障;

若

$$U_L < 1.2 \text{ V} \quad (7)$$

判为永久性故障;

否则调用相位判据,如式(4)和(5)所示。

2.2 带并联补偿电抗器线路

2.2.1 电压幅值判据

在带并联补偿电抗器的输电线路发生瞬时性故障断开相电压会产生拍频现象,拍频的周期和幅值随着补偿度增大而减小。一般拍频的频率均低于工频。发生永久性故障以后,断开相端电压仅有电磁耦合电压,其幅值由故障点位置决定。电磁耦合电压为工频分量,幅值相对瞬时性故障的拍频电压要小很多。现利用以上特性提出如下幅值判据:

$$\text{sum } U(m) = \sum_{k=1}^{5N} |U(m+k) - U(m+k-N)| \quad (8)$$

式中 $U(\cdot)$ 为端电压; N 为每周周期采样点数。

$$\bar{U} = \frac{1}{2N} \sum_{m=N}^{3N-1} \text{sum } U(m) \quad (9)$$

若

$$\bar{U} > U_{zd} \quad (10)$$

则可判为瞬时性故障,否则为永久性故障。其中, U_{zd} 可设为 1 V 左右。

2.2.2 电压相位判据

$$\theta(m) = \arctan \left[\sum_{n=1}^{5N} |U(m+n) - U(m+n-1)|^2 \right] \quad (11)$$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2N} \sum_{m=1}^{2N} \theta(m) \quad (12)$$

若

$$\bar{\theta} > 20^\circ \quad (13)$$

则可判为瞬时性故障,否则为永久性故障。其中 $U(\cdot)$ 为端电压, N 为每周周期采样点数, $\arctan$ 表示取反正切值。

幅值判据和相位判据判别结果与门输出,只有两者同时判为瞬时性故障时重合闸才动作,以保证不会重合于永久性故障,减少对系统的冲击。该判据适用于两端带并联电抗器的线路,也适用于一端带并联电抗器的线路。

3 双回线保护配置方案

PSL603UC 电流差动保护和 PSL602UC 纵联距离保护,具有跨线故障选跳的后备距离保护及自适应重合闸逻辑组成。图 2 为国电南自双回线保护配

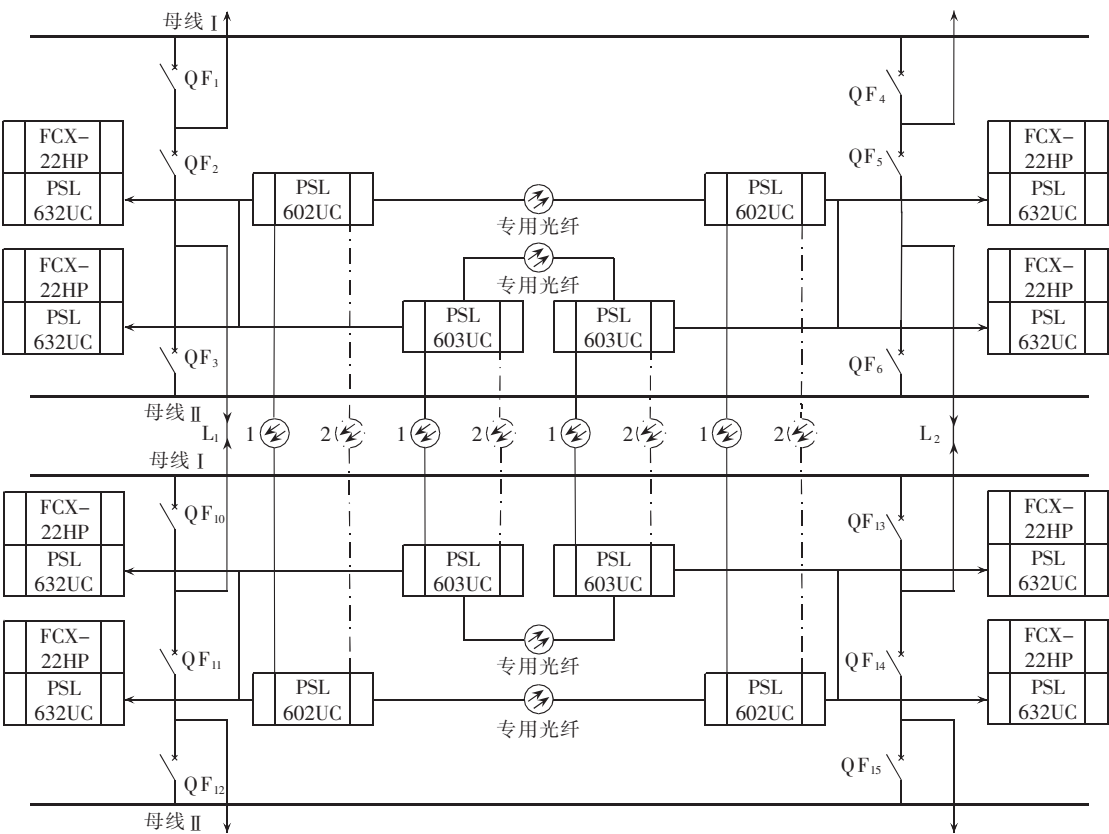


图 2 双回线保护配置示意图

Fig.2 Protection configuration for parallel lines

置示意图(传输媒介均为专用光纤)。PSL 632 UC 为数字式断路器保护,按断路器来配置,本身带有常规重合闸功能。PSL603 UC 和 PSL602 UC 的自适应重合闸均可输出 3 个分相合闸命令,2 组分相合闸命令并行接入作为 PSL632 UC 的开入,由 PSL632 UC 通过 FCX-22HP 断路器操作箱实现分相合闸。另外,PSL603UC 和 PSL602UC 保护还需输出一个自适应重合闸的闭锁信号(在电压互感器断线、光纤通信中断等情况下输出)给 PSL632 UC 保护装置。PSL 603UC 和 PSL602 UC 输出的 2 组自适应重合闸闭锁信号串行接入 PSL632 UC,在 2 套线路保护自适应重合闸均被闭锁时才闭锁自适应重合闸逻辑,由 PSL632UC 按常规重合闸动作。

在 3/2 接线,另外一条线路为非同杆并架双回线的情况下,该条线路保护需要引出一组跳闸信号给中间断路器保护 PSL632UC,以启动 PSL632UC 的常规重合闸逻辑。

4 算例仿真验证

为了验证算法的有效性,利用 ATP 和 RTDS 做了大量的仿真验算工作,图 3 为一条 500 kV 双回输电系统模型。

线路全长为 300 km,其中中间 240 km 为同杆双回线,M 端的正序阻抗为 $Z_{M1}=j60.00\ \Omega$;零序阻抗为 $Z_{M0}=j46.80\ \Omega$ 。N 端正序阻抗为 $Z_{N1}=j45.20\ \Omega$;零序阻抗为 $Z_{N0}=j22.01\ \Omega$ 。

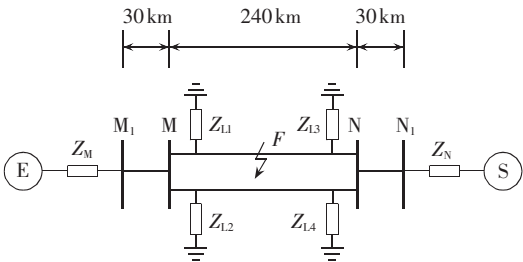


图 3 500 kV 双回输电线路模型

Fig.3 Simulation model of 500 kV parallel lines

线路正序参数为

$r_1=0.027\ \Omega/\text{km},\omega l_1=0.303\ \Omega/\text{km},\omega c_1=4.27\times 10^{-6}\ \text{s}/\text{km}$
零序参数为

$r_0=0.196\ \Omega/\text{km},\omega l_0=0.695\ \Omega/\text{km},\omega c_0=2.88\times 10^{-6}\ \text{s}/\text{km}$
两回线之间的互阻抗为

$r'_m=0.064\ \Omega/\text{km},\omega l'_m=0.131\ \Omega/\text{km},\omega c'_m=0.467\times 10^{-6}\ \text{s}/\text{km}$

表 1 列出了双回线不带并联电抗器情况下幅值、相位判据在单相接地故障情况下的计算结果。表 2 和表 3 分别列出了在线路两端带并联电抗器和一端带并联电抗器情况下所提判据的计算判别结果(表中故障位置为占线路全长的百分值)。由此可看出在线路任何地方,经任何大小过渡电阻故障的情况下所提出的新的自适应重合闸方案都能很好地区分瞬时性故障和永久性故障。图 4 和图 5 分别列出了在带并联电抗器情况下距 M 端 30 % 处的 F 点发生瞬时性故障和永久性故障情况下,故障线 M 端电压和幅值、相位判据计算结果。

表 1 线路不带并联电抗器判据仿真结果

Tab.1 Simulation results of lines without shunt reactors

过渡电阻	故障位置	故障类型	$\alpha/(^{\circ})$	U_L/V	判别结果	过渡电阻	故障位置	故障类型	$\alpha/(^{\circ})$	U_L/V	判别结果
0	5 %	瞬时	0.783 4	5.214 9	正确	500 Ω	5 %	瞬时	0.031 3	5.193 7	正确
		永久	95.204	0.049 7	正确			永久	63.162	2.351 1	正确
	30 %	瞬时	0.410 9	5.189 0	正确		30 %	瞬时	0.017 9	5.194 1	正确
		永久	96.749	0.577 0	正确			永久	63.858	2.519 7	正确
	50 %	瞬时	0.381 5	5.199 7	正确		50 %	瞬时	0.048 7	5.193 9	正确
		永久	93.432	0.436 9	正确			永久	63.736	2.650 4	正确
	70 %	瞬时	0.290 8	5.189 4	正确		70 %	瞬时	0.033 4	5.194 2	正确
		永久	89.340	0.763 2	正确			永久	63.030	2.776 7	正确
	95 %	瞬时	3.918 7	5.222 7	正确		95 %	瞬时	0.055 2	5.196 2	正确
		永久	82.388	0.827 5	正确			永久	61.321	2.928 8	正确

表 2 线路两端带并联电抗器判据仿真结果

Tab.2 Simulation results of lines with shunt reactors at both ends

过渡电阻	故障位置	故障类型	$\bar{\theta}/(^{\circ})$	$\bar{U}/V$	判别结果	过渡电阻	故障位置	故障类型	$\bar{\theta}/(^{\circ})$	$\bar{U}/V$	判别结果
0	5 %	瞬时	65.508	19.873	正确	500 Ω	5 %	瞬时	87.992	82.689	正确
		永久	0.000 8	0.022 6	正确			永久	1.353 0	0.008 1	正确
	30 %	瞬时	36.039	5.852 7	正确		30 %	瞬时	87.977	82.410	正确
		永久	0.022 7	0.069 6	正确			永久	1.575 2	0.004 0	正确
	50 %	瞬时	89.333	144.59	正确		50 %	瞬时	87.951	81.883	正确
		永久	0.049 3	0.066 9	正确			永久	1.761 5	0.003 8	正确
	70 %	瞬时	38.679	7.206 5	正确		70 %	瞬时	87.919	81.230	正确
		永久	0.089 0	0.087 4	正确			永久	1.955 1	0.003 0	正确
	95 %	瞬时	61.819	17.694	正确		95 %	瞬时	87.826	79.386	正确
		永久	0.139 4	0.240 7	正确			永久	2.208 4	0.005 9	正确

表 3 线路一端带并联电抗器判据仿真结果

Tab.3 Simulation results of lines with shunt reactors at one end

过渡电阻	故障位置	故障类型	$\bar{\theta}/(^{\circ})$	$\bar{U}/V$	判别结果	过渡电阻	故障位置	故障类型	$\bar{\theta}/(^{\circ})$	$\bar{U}/V$	判别结果
0	5 %	瞬时	37.050	4.907 4	正确	500 Ω	5 %	瞬时	46.497	9.685 0	正确
		永久	0.000 5	0.023 3	正确			永久	1.060 1	0.005 4	正确
	30 %	瞬时	32.729	1.881 2	正确		30 %	瞬时	46.913	9.856 4	正确
		永久	0.016 6	0.063 5	正确			永久	1.283 5	0.002 3	正确
	50 %	瞬时	58.313	14.615	正确		50 %	瞬时	47.012	9.895 7	正确
		永久	0.038 5	0.058 3	正确			永久	1.484 0	0.003 2	正确
	70 %	瞬时	50.576	11.263	正确		70 %	瞬时	46.913	9.856 4	正确
		永久	0.085 5	0.114 6	正确			永久	1.283 5	0.002 3	正确
	95 %	瞬时	74.344	24.740	正确		95 %	瞬时	46.991	9.875 2	正确
		永久	0.163 5	0.379 3	正确			永久	2.042 4	0.004 7	正确

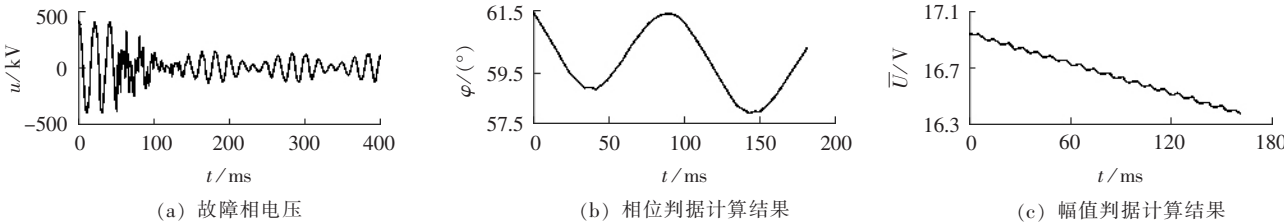


图 4 瞬时性故障仿真结果

Fig.4 Simulation results of transient fault

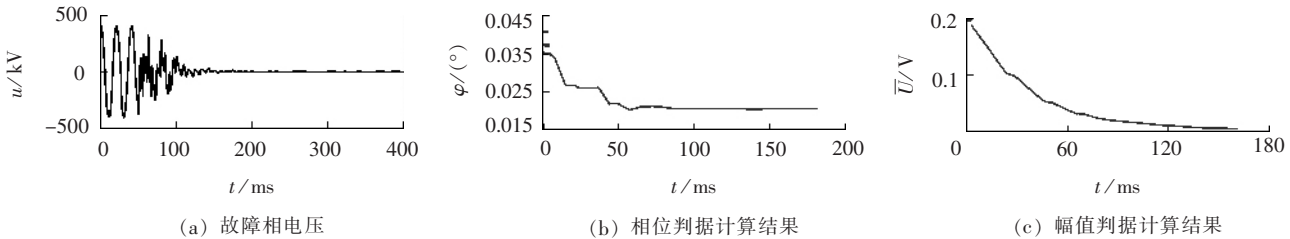


图 5 永久性故障仿真结果

Fig.5 Simulation results of permanent fault

5 结论

通过对现有方法的研究和比较,提出了新的可用于同杆双回线的自适应重合闸方案。对于不带并联电抗器的输电线路,在瞬时性故障和永久性故障时,电压幅值差别较大,故障相与健全相电压和之间的相位差有近 90° 的区别,综合两者提出了新的幅值、相位判据;而带并联电抗器的线路,发生瞬时性故障的故障相电压产生拍频现象,而永久性故障的故障相电压迅速衰减,感应电压呈工频特性。基于此提出了新的幅值和相位判据,两者判别结果与门输出,只有两者同时判为瞬时性故障重合闸才动作,以尽力避免重合于永久性故障,减少由于重合于永久性故障所带来的损失。该判据无论对一端带并联电抗器线路还是对两端同时带并联电抗器线路一样适用。

参考文献:

- [1] GE Yao-zhong, SUI Feng-hai, XIAO Yuan. Prediction methods for preventing single-phase re-closing on permanent fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [2] 索南加乐, 刘辉, 吴亚萍, 等. 基于故障测距的单相自动重合闸永久故障电压自适应补偿判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 80-84.
SUONAN Jia-le, LIU Hui, WU Ya-ping, et al. An adaptive voltage compensation criterion for permanent fault in the single phase automatic re-closing based on fault location [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 80-84.
- [3] DJURIC M B, TERZIJA V V. A new approach to the arcing faults detection for fast autoreclosing in transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1793-1798.
- [4] 李斌, 李永丽, 曾治安, 等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-57.
LI Bin, LI Yong-li, ZENG Zhi-an, et al. Study on single-pole adaptive reclosure based on analysis of voltage harmonic signal [J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 53-57.

- [5] 范越, 施围. 在单相自动重合闸中检测电弧故障的新方法[J]. 继电器, 1999, 27(6): 5-7.
FAN Yue, SHI Wei. New method for detect instantaneous fault in single-pole adaptive reclosure[J]. Relay, 1999, 27(6): 5-7.
- [6] FITTON D S, DUMN R W, AGGARWAL R K, et al. Design and implementation of an adaptive single pole auto re-closure in transmission lines using artificial neural networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 748-756.
- [7] 岗村正己, 太田宏次. 输配电线路继电保护[M]. 牟敦庚, 译. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [8] 袁季修. 同杆双回线多路重合闸的应用[J]. 电力自动化设备, 1991, 11(2): 14-20.
YUAN Ji-xiu. The adaptive re-closure for parallel lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 1991, 11(2): 14-20.
- [9] 郑玉平, 黄震, 张哲, 等. 同杆并架双回线自适应重合闸的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 58-61.
ZHENG Yu-ping, HUANG Zhen, ZHANG Zhe, et al. Study of the adaptive re-closing for parallel lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 58-61.
- [10] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [11] 李斌, 李永丽, 黄强, 等. 单相自适应重合闸相位判据的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 41-44.
LI Bin, LI Yong-li, HUANG Qiang, et al. Study of phase criterion for single pole auto re-closure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 41-44.
- [12] 牛晓明, 王晓彤, 施围, 等. 超高压串联补偿输电线路的潜供电流和恢复电压[J]. 电网技术, 1998, 22(9): 9-16.
NIU Xiao-ming, WANG Xiao-tong, SHI Wei, et al. Secondary arc current and recovery voltage of series compensated EHV transmission line[J]. Power System Technology, 1998, 22(9): 9-16.

(责任编辑: 李玲)

作者简介:

朱建红(1974-), 男, 江苏靖江人, 工程师, 主要从事差动保护、断路器保护和自适应重合闸方面的研发工作(E-mail: zjh@sac-china.com);

陈福锋(1979-), 男, 江苏宜兴人, 设计师, 硕士, 主要从事距离保护、纵联保护和自适应重合闸方面的研发工作(E-mail: fugiant@163.com)。

Study of selfadaptive reclosing for parallel lines

ZHU Jian-hong¹, CHEN Fu-feng¹, WEI Yao¹, CHEN Wei¹, SONG Guo-bin²,
GUO Xiao-jun¹, MA Wen-long¹

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China;
2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new method of selfadaptive reclosing for parallel lines is proposed and a new protection configuration scheme for parallel lines is brought forward. When transient fault occurs in the transmission line with parallel compensating reactor, the beat frequency exists in broken phase voltage. Its frequency is the low frequency component. When permanent fault occurs, the broken phase voltage is mainly the induced voltage by healthy phases. Its frequency is power frequency. 20 ms-step differential of fault phase recovery voltage is used to distinguish transient fault from permanent fault. The calculated voltage amplitude is high for transient fault, while it is zero for permanent fault. In addition to the comparison of the differential voltage amplitude, phase criterion is also used to improve the credibility. The new method is suitable for lines without shunt reactors, as well as lines with shunt reactors at one or two ends. EMTP and RTDS digital simulations show its good feasibility and engineering value.

Key words: selfadaptive reclosing; parallel lines; amplitude and phase criterion; parallel reactor; EMTP simulation