

# 基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据

赵庆明<sup>1</sup>, 李斌<sup>2</sup>

(1. 贵州电力试验研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 对瞬时性故障和永久性故障进行了详细的分析, 提出了一种基于电压补偿原理的新型相位判据。该判据通过对断开相端电压分别进行两种适当的补偿, 获得用于比相的两个相量, 保证在瞬时性故障时两者反向; 而在永久性故障时, 两者接近于同向。该判据原理简单、可靠, 不受过渡电阻、负荷电流和故障点位置的影响, 仅利用线路的单端信息即可实现故障的判别, 不需要故障测距装置, 适用于不带并联电抗器超高压线路。EMTDC 仿真实验证明了该方法的正确性和有效性。

**关键词:** 电力系统; 自适应重合闸; 瞬时性故障; 永久性故障; 电压补偿; 新型相位判据

## A new phase criterion for single-pole adaptive reclosure based on voltage compensation

ZHAO Qing-ming<sup>1</sup>, LI Bin<sup>2</sup>

(1. Guizhou Electric Power Testing & Research Institute, Guiyang 550002, China;

2. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, china)

**Abstract:** The characteristics of transient faults and permanent faults are analyzed, and a new phase criterion for single-pole adaptive reclosure is proposed based on voltage compensation. Two phasors for phase comparison can be obtained after the terminal voltages of opened phase are properly compensated. The directions of the two phasors are reverse for transient faults, and are almost the same for permanent faults. The proposed criterion is simple and reliable, and can be hardly influenced by fault resistance, load current and fault location. The criterion only uses one-terminal data, and it can be applied to EHV transmission lines without shunt reactors. EMTDC simulations show that the proposed criterion is correct and valid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50607014).

**Key words:** power system; adaptive reclosure; transient fault; permanent fault; voltage compensation; new phase criterion

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0050-05

## 0 引言

自动重合闸技术是维持电力系统安全稳定运行的重要控制手段, 但如果重合于永久性故障, 则将给系统带来二次冲击, 对系统以及电气设备造成更严重的破坏。因此, 研究自适应重合闸技术使其能够在一线识别出故障的性质, 并且只重合于瞬时性故障有着很强的实用价值<sup>[1]</sup>。

目前, 对于线路故障性质的判别主要有基于断开相电弧暂态特性判别和基于熄弧后电压恢复阶段电压和电流特征判别两种方法。故障相断开后, 在永久性故障时短路点电弧会很快熄灭, 但在瞬时性故障情况下电弧存在一个燃烧和熄灭的反复过程, 因此, 可以根据电弧的特性来判断故障的性质, 但电弧的特性受诸多因素的影响并且具有很强的非线性

性, 限制了该方法在实际中的应用<sup>[2-3]</sup>。基于电压恢复阶段的电气量特征来判断故障的性质是最接近于实用化的方法, 可以分为两类: 对于不带并联电抗器的线路主要是利用故障断开相的电压特性判别故障性质<sup>[4-9]</sup>; 对于带并联电抗器的线路主要是利用并联电抗器的电流特性判别故障性质<sup>[10-12]</sup>。

对于不带并联电抗器的超高压线路, 只能使用稳态恢复阶段的电压特征作为判别依据。文献[4]提出了一种基于模糊综合决策的判别方法, 但模糊控制决策表的确定需要取得系统在各种运行方式下的数据, 有较大的主观性; 文献[5]提出了修正电压判据, 但该判据需要对侧的信息配合; 文献[6]提出了一种基于恢复电压相位特征的故障判别方法, 但该方法在线路空载或轻载的情况下会出现误判, 并且需要电压判据作为辅助判据; 文献[7]提出一种基于故障测距的判别方法, 但不适用于故障测距失败的情况; 文献[8-9]提出了基于相关性分析的故障判别

方法, 但算法本身仍受到负荷电流的影响, 运行方式的变化会影响算法的准确性。

本文利用瞬时性故障时断开相端电压具有明确特征为基础, 通过对瞬时性故障时端电压进行适当的变换作为两种电压补偿量, 并对实际测得的端电压进行补偿后构成适用于单相自适应重合闸的新型相位判据。该判据不受线路长度、过渡电阻、负荷电流和故障点位置的影响, 并且具有只需要线路单端信息, 不需要故障测距配合和灵敏度高的优点。大量的仿真试验证明了该方法的有效性和准确性。

## 1 单相接地时的故障特征分析<sup>[1]</sup>

### 1.1 瞬时性故障时的电气量特征

以 A 相故障为例, 瞬时故障发生时, 故障相断开, 当短路点电弧熄灭后, 线路转为两相运行状态, 如图 1 所示。

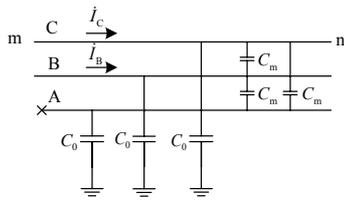


图 1 输电线路单相断开后的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of transmission line after single-pole breaker tripped

故障相和健全相之间存在电容耦合电压  $\dot{U}_y$  和电磁耦合电压  $\dot{U}_{xl}$ 。如图 1 所示, 以 A 相故障为例, 则  $\dot{U}_y$  和  $\dot{U}_{xl}$  分别为:

$$\dot{U}_y = (\dot{U}_B + \dot{U}_C) \frac{C_m}{C_0 + 2C_m} \quad (1)$$

$$\dot{U}_{xl} = (\dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_m L \quad (2)$$

式中:  $Z_m$  为输电线路单位长度的互感;  $L$  为线路的长度;  $C_m$  和  $C_0$  分别为相间电容和相对地电容。

将线路参数以 T 型等效, 功率因数  $\cos \theta = 1$ , 并且互感阻抗角为  $90^\circ$ , 则瞬时性故障时, 线路断开相两端电压的矢量关系如图 2 所示。

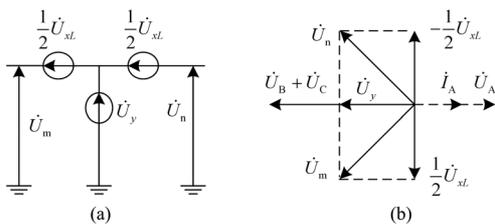


图 2 瞬时性故障线路两端电压

Fig.2 Line terminal voltages of transient fault

### 1.2 单相永久性故障时的电气量特征

永久性故障时, 故障线路两端的电压可以看成是故障点的电容耦合分别与线路两端至故障点的电磁耦合电压的矢量和。永久性故障时故障点的电容耦合电压等效电路如图 3 所示。

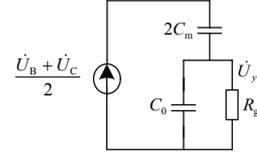


图 3 永久性故障时电容耦合电压的等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of capacitive coupling voltage of permanent fault

由图 3 可以得出, 当接地电阻  $R_g$  大于零时, 永久性故障时的电容耦合电压和电磁耦合电压为:

$$\dot{U}'_y = \frac{(\dot{U}_B + \dot{U}_C) R_g (j\omega C_m)}{1 + R_g (j\omega)(C_0 + 2C_m)} \quad (3)$$

$$\dot{U}'_{xl} = (\dot{I}_B + \dot{I}_C) Z_m l \quad (4)$$

上式中  $l$  为故障点距离线路首端的距离。

以图 4 所示的典型超高压输电系统为例, 定性分析  $\dot{U}'_y$  的幅值和相位随接地电阻的变化特性。可以分析得出, 随着接地电阻的变化, 永久性接地故障时电容耦合电压最大幅值只有瞬时性故障时的 30% 左右, 相位超前为  $72^\circ \sim 90^\circ$  之间。

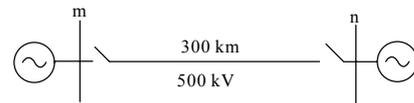


图 4 仿真系统图

Fig.4 Power system for simulation

该仿真系统的参数如下: 线路正序参数:  $R_1 = 0.01 \Omega/\text{km}$ ,  $X_1 = 0.255 \Omega/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.014 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 线路零序参数:  $R_0 = 0.18 \Omega/\text{km}$ ,  $X_1 = 0.993 \Omega/\text{km}$ ,  $C_0 = 0.008 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 系统参数:  $Z_{m1} = j20 \Omega$ ,  $Z_{m0} = j30 \Omega$ ,  $Z_{n1} = j40 \Omega$ ,  $Z_{n0} = j60 \Omega$ ; 线路长度  $L = 300 \text{ km}$ 。

## 2 单相自适应重合闸新型相位判据

### 2.1 基于电压补偿原理的相位判据

由于瞬时性故障时, 故障相端电压可以准确的分析和表示, 因此本文以瞬时性故障模型为基础, 构造两个新型补偿电压。由于电磁耦合电压随负荷电流而变化, 而电容耦合电压一般较为固定并且数值相对较大, 因此取补偿电压  $\dot{U}_{P1}$ 、 $\dot{U}_{P2}$  和用于比相的电压  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$  分别为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{P1} = 0.8\dot{U}_y + 0.5\dot{U}_{xL} \\ \dot{U}_{P2} = 1.2\dot{U}_y + 0.5\dot{U}_{xL} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U} - \dot{U}_{P1} \\ \dot{U}_2 = \dot{U} - \dot{U}_{P2} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)中： $\dot{U}_y$ 为根据式(1)计算得到的电容耦合电压； $\dot{U}_{xL}$ 为根据式(2)计算得到的电磁耦合电压；在式(6)中 $\dot{U}$ 为断开相的端电压。

由上文可知，在瞬时性故障情况下，故障断开相端电压 $\dot{U} = \dot{U}_y + 0.5\dot{U}_{xL}$ ，根据式(5)和式(6)对断开相端电压 $\dot{U}$ 进行补偿可知：

$$\dot{U}_1 = \dot{U} - \dot{U}_{P1} = 0.2\dot{U}_y \quad (7)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U} - \dot{U}_{P2} = -0.2\dot{U}_y \quad (8)$$

因此，在瞬时性故障情况下， $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 之间的角度为 $180^\circ$ 。

当线路发生永久性接地故障时，同样按照式(5)和式(6)进行补偿，可以推导出下式：

$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_y + \dot{U}'_{xL} - 0.8\dot{U}_y - 0.5\dot{U}_{xL} \quad (9)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}'_y + \dot{U}'_{xL} - 1.2\dot{U}_y - 0.5\dot{U}_{xL} \quad (10)$$

下面以金属性接地故障为例讨论永久性故障情况下 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 之间的相位关系。 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 之间的相位关系如图5所示。

在图5中， $\delta = |\arg(\dot{U}_1/\dot{U}_2)|$ ， $\theta$ 为功率因数角， $oa = -0.8\dot{U}_y$ ， $ob = -1.2\dot{U}_y$ ， $oe = \dot{U}'_y$ ， $of = \dot{U}'_{xL}$ 。由图5可以看出， $\delta$ 是随着功率因数角以及电磁耦合电压的变化而变化。

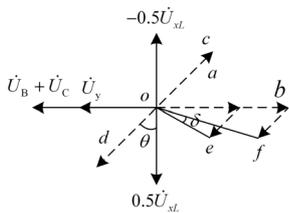


图5 永久故障时 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 相位关系( $R_g = 0 \Omega$ )

Fig.5 Phase of permanent faults between

$$\dot{U}_1 \text{ and } \dot{U}_2 (R_g = 0 \Omega)$$

令 $k_s = |(\dot{U}'_{xL} - 0.5\dot{U}_{xL})/(\dot{U}'_y)|$ ，则由图5可知， $\delta$ 为 $\angle aoe$ 与 $\angle bof$ 之差，可以由下式表示：

$$\delta = \arctg(k_s \cos\theta / (0.8 - k_s \sin\theta)) - \arctg(k_s \cos\theta / (1.2 - k_s \sin\theta))$$

上式中 $k_s$ 相当于图5中的 $|ae|$ 和 $|bf|$ 相对于 $|\dot{U}'_y|$ 做归一化处理。下面将使用Matlab定性分析 $\delta$ 的变化趋势，可以得出 $\delta$ 随 $|k_s|$ 的变化曲线，如图6所示。

由图6可以看出，在功率因数角为 $80^\circ$ 时， $\delta$ 最大值达到了 $98^\circ$ ，而在功率因数角为 $0^\circ$ 时， $\delta$ 最大值仅为 $11^\circ$ ，因此可以根据 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{U}_2$ 之间的相角差将瞬时性故障和永久性故障完全区别开来。

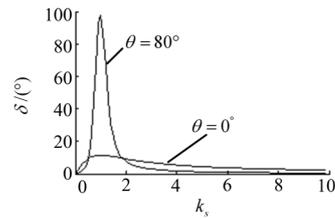


图6 永久性故障时功率因数角和电磁耦合电压对 $\delta$ 的影响 ( $R_g = 0 \Omega$ )

Fig.6 Effects of power factor and inductive coupling voltage for  $\delta$  in the case of permanent fault ( $R_g = 0 \Omega$ )

需要说明的是，功率因数角 $\theta$ 实际上可以取 $-180^\circ \sim \pm 180^\circ$ 之间的任何值。受篇幅所限，本文仅以 $\theta$ 位于 $0 \sim 90^\circ$ 的典型区间进行讨论，当 $\theta$ 在 $80^\circ \sim 90^\circ$ 之间时，线路接近于只传输无功，由于无功不能进行远距离大容量传输，故障线路的电感耦合电压 $\dot{U}'_{xL}$ 很小，因此由图5可知，永久性故障时， $\dot{U}_1$ 与 $\dot{U}_2$ 之间的角度差接近于 $0$ 。上述分析对 $\theta$ 位于其它角度区间同样适用。

根据上述分析，本文提出基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据，永久性故障的判据如下：

$$|\arg(\dot{U}_1/\dot{U}_2)| < \varphi_d \quad (11)$$

式(11)中， $\varphi_d$ 判据的门槛值，根据实际情况可以取为 $100^\circ \sim 120^\circ$ 。满足式(11)则判为永久性故障，否则判为瞬时性故障。

## 2.2 过渡电阻对相位判据的影响

在瞬时性故障情况下，由于故障消失，所以过渡电阻对本文所提出的相位判据没有影响。

当线路发生永久性故障时，由于过渡电阻的影响，式(9)和式(10)中的 $\dot{U}'_y \neq 0$ ，考虑在过渡电阻最大为 $300 \Omega$ 情况下， $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 之间的相位关系如图7所示。

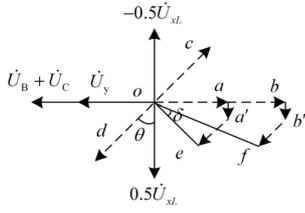


图7 永久性故障经过渡电阻接地时  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_2$  相位关系 ( $R_g = 300 \Omega$ )

Fig.7 Phase of permanent faults between  $\dot{U}_1$  and  $\dot{U}_2$  with fault resistance ( $R_g = 300 \Omega$ )

在图7中, 由于受到过渡电阻的影响,  $\dot{U}'_y = aa' = bb'$ , 同样使用 Matlab 可以定性分析出  $\delta$  随功率因数角和电磁耦合电压变化的关系曲线图, 如图8所示。

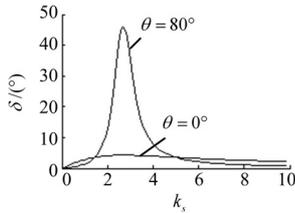


图8 永久性故障时功率因数角和电磁耦合电压对  $\delta$  的影响 ( $R_g = 300 \Omega$ )

Fig.8 Effects of power factor and inductive coupling voltage for  $\delta$  in the case of permanent faults ( $R_g = 300 \Omega$ )

由图8可以看出, 在功率因数角为  $80^\circ$  时,  $\delta$  最大为  $45^\circ$  左右, 因此过渡电阻对本文所提判据没有影响; 过渡电阻越大, 本文所提判据的裕度也越大。

### 2.3 新型相位判据特性分析

由上述分析可知, 本文所提出的基于电压补偿原理的单相自适应新型相位判据具有如下特性:

(1) 判据不受过渡电阻的影响。永久性故障时, 过渡电阻越大, 本文所提出的相位判据门槛值裕度越大。

(2) 判据不受负荷电流的影响。本文所提出的判据充分考虑了健全相负荷电流对断开相的影响, 因此判据的有效性与故障线路健全相的负荷电流大小无关, 并且与永久性故障时线路的故障点位置无关, 能够适应系统的各种运行方式。

(3) 判据实现简单、清晰, 只需要线路的单端信息即可实现, 不需要电压辅助判据和故障测距装置。

需要说明的是, 由于本文所提出的相位判据是在线路单相故障时两端完全断开情况下分析得出

的, 因此当故障相的一侧先合闸时, 另一侧的重合闸相位判据将不满足要求, 解决的方法是在故障相两端完全断开的情况下, 当线路两端的相位判据连续  $N$  点采样均判为瞬时性故障时, 则将故障性质判定为瞬时性故障并记忆, 两侧的重合闸装置在规定时间内无条件重合。

### 3 EMTDC 仿真分析

为了验证判据的有效性, 本文利用 EMTDC 对本文所提出的基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据进行了大量的仿真验证, 仿真系统如图4所示, 参数同前, 式(11)中的门槛值  $\varphi_d$  取  $110^\circ$ 。仿真结果如表1~4所示, 表中  $R_g$  表示接地电阻,  $\gamma$  表示两侧电源相角差,  $l$  表示故障点距离首端的距离, 本文采用全周傅氏算法, 采样频率为 1 kHz。

表1~4为 m 侧的重合闸判据结果。由表1可以看出, 瞬时性故障情况下判据结果不受负荷电流的影响; 由表2可知, 永久性故障情况下, 判据的有效性不受负荷电流的影响, 由于空载时线路中主要存在容性电流, 致使空载情况下  $\dot{U}_1$  与  $\dot{U}_2$  之间的相角差略大一些; 由表3可以看出, 判据能够适应永久性故障情况下各种接地电阻的情况, 并且在各种故障情况下判据都有足够的裕度; 由表4可以看出, 对于线路中任意一点发生故障, 本文所提出的判据均能够有效判别, 并且由于电磁耦合电压的影响, 在线路两端  $\dot{U}_1$  与  $\dot{U}_2$  之间的夹角最大。

表1 不同负荷电流时瞬时性故障判据结果

Tab.1 Result of criterion of transient faults with different load currents

$\gamma / (^\circ)$	0	10	30	60	90
$\left  \arg \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right) / (^\circ) \right $	168	172	173	173	172

表2 不同负荷电流时永久性故障判据结果

( $R_g = 300 \Omega, l = 50 \text{ km}$ )

Tab.2 Result of criterion of permanent faults with different load currents ( $R_g = 300 \Omega, l = 50 \text{ km}$ )

$\gamma / (^\circ)$	0	10	30	60	90
$\left  \arg \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right) / (^\circ) \right $	9	6	2	4	6

表 3 不同故障接地电阻时永久性故障判据结果  
( $\gamma = 80^\circ, l = 200 \text{ km}$ )

Tab.3 Result of criterion of permanent faults with different fault earth resistances ( $\gamma = 80^\circ, l = 200 \text{ km}$ )

$R_g/\Omega$	0	10	50	100	300
$\left  \arg \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right) / (^\circ) \right.$	10	11	12	13	18

表 4 不同故障距离时永久性故障判据结果  
( $\gamma = 80^\circ, R_g = 10 \Omega$ )

Tab.4 Result of criterion of permanent faults with different fault distances ( $\gamma = 80^\circ, R_g = 10 \Omega$ )

$l/\text{km}$	0	50	150	200	300
$\left  \arg \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right) / (^\circ) \right.$	10	10	2	11	15

另外，本文还给出了不同情况下 n 侧的重合闸判据结果，如表 5、6 所示， $l$  与  $\gamma$  的含义与上文相同。由表 5、6 可知，本文所述判据对线路两侧重合闸装置都适用。

表 5 不同故障距离永久性故障 n 侧判据结果  
( $\gamma = 80^\circ, R_g = 10 \Omega$ )

Tab.5 Result of n' criterion of permanent faults with different fault distances ( $\gamma = 80^\circ, R_g = 10 \Omega$ )

$l/\text{km}$	0	50	150	200	300
$\left  \arg \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right) / (^\circ) \right.$	9	10	1	10	15

表 6 不同负荷电流时永久性故障 n 侧判据结果  
( $R_g = 10 \Omega, l = 50 \text{ km}$ )

Tab.6 Result of n' criterion of permanent faults with different load currents ( $R_g = 10 \Omega, l = 50 \text{ km}$ )

$\gamma / (^\circ)$	0	10	30	60	90
$\left  \arg \left( \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right) / (^\circ) \right.$	2	3	6	9	9

#### 4 结语

本文在对瞬时性故障和永久性故障详细分析的基础上，提出了一种基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据。该判据原理简单、清晰，具有不受负荷电流、故障接地电阻和故障点位置影响的优点，另外，本文所提出的判据只需要线路的单端信息即可实现对故障性质的判别，不需要电压辅助判据和故障测距装置，适用于不带并联电抗器

的超高压输电线路。大量的仿真实验证明了所得结论。

#### 参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]. 二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [2] Zoric K J, Djuric M B, Terzija V V. Arcing faults detection on overhead lines from the voltage signals[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1997, 19(5): 299-303.
- [3] 林湘宁, 刘海峰, 鲁文军, 等. 基于广义多分辨形态学梯度的自适应单相重合闸方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 101-106.  
LIN Xiang-ning, LIU Hai-feng, LU Wen-jun, et al. Generalized multi-resolution morphological gradient based self-adaptive single-phase reclosure scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 101-106.
- [4] 林湘宁, 朱海昱, 刘沛. 基于模糊综合决策的自动化重合闸优化判据的研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 44-47.  
LIN Xiang-ning, ZHU Hai-yu, LIU Pei. The study on optimal automation reclosing criteria based on fuzzy synthetic decision[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 44-47.
- [5] 范越, 施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.  
FAN Yue, SHI Wei. Modification of voltage criterion in the single-pole automatic reclosing of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 44-47.
- [6] 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 on phase criterion for single-pole adaptive reclosure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 41-44.
- [7] 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.
- [8] 成敬周, 张举, 王增平, 等. 基于采样值相关法及改进型判别超高压输电线路的故障性质[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 26-30, 64.  
CHENG Jing-zhou, ZHANG Ju, WANG Zeng-ping, et al. Identification of the transient faults occurring on the extra high voltage transmission lines based on correlation analysis and its improved algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 26-30, 64.

(下转第 60 页 continued on page 60)

- swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (1): 411-418.
- [11] 赵建国, 韩学山, 程时杰. 网络流和内点法相结合的有功动态优化调度[J]. 电力系统及其自动化, 2003, 27 (23): 22-27.  
ZHAO Jian-guo, HAN Xue-shan, CHENG Shi-jie. Optimal active power dispatch combining network flow and interior point methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (23): 22-27.
- [12] 李秀卿, 罗忠游, 郭芳义. 基于网络流和内点法的电力系统动态经济调度[J]. 继电器, 2006, 34(10): 37-40, 45.  
LI Xiu-qing, LUO Zhong-you, GUO Fang-yi. Dynamic economic dispatch combining network flow and interior point approaches[J]. Relay, 2006, 34 (10): 37-40, 45.
- [13] 韦化, 李滨, 杭乃善, 等. 基于现代内点非线性规划的大规模水火电力系统最优潮流的理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (4): 5-8.  
WEI Hua, LI Bin, HANG Nai-shan, et al. An analysis of interior point theory for large-scale hydrothermal optimal power flow problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (4): 5-8.
- [14] 韩学山, 柳焯. 一种实用的电力系统在线动态经济调度模型[J]. 中国电力, 2002, 35 (9): 28-32.  
HAN Xue-shan, LIU Zhuo. A practical model of on-line dynamic economic dispatching in power system[J]. Electric Power, 2002, 35 (9): 28-32.
- [15] 王超, 张晓明, 唐茂林, 等. 四川电网节能减排发电实时调度优化模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 93-96.  
WANG Chao, ZHANG Xiao-ming, TANG Mao-lin, et al. Real-time dispatching optimization model for energy-saving and emission-reduction generation in sichuan grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (4) : 93-96.
- [16] Senjyu T, Shimabukuro, Uezato K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 822-888.
- [17] 杨朋朋, 韩学山. 基于改进拉格朗日乘子修正方法的逆序排序机组组合[J]. 电网技术, 2006, 30 (9): 40-45.  
YANG Peng-peng, HAN Xue-shan. Unit commitment based on improved lagrangian multiplier modification method[J]. Power System Technology, 2006, 30 (9): 40-45.
- [18] 黎静华, 韦化. 求解机组组合问题的邻域搜索法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 33-40.  
LI Jing-hua, WEI Hua. Unit commitment via local search point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 33-40.

收稿日期: 2009-08-23; 修回日期: 2009-09-23

作者简介:

王 剑 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: sword\_king@126.com

刘天琪 (1962-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制, 高压直流输电和调度自动化;

刘学平 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, 分布式发电。

(上接第 54 页 continued from page 54)

- [9] 王增平, 刘浩芳, 徐岩, 等. 基于改进型相关法的单相自适应重合闸新判据[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 49-55.  
WANG Zeng-ping, LIU Hao-fang, XU Yan, et al. A new criterion for single-phase adaptive automatic reclosure based on improved correlation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 49-55.
- [10] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟, 等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75-81.  
SUONAN Jia-le, SUN Dan-dan, FU Wei, et al. Identification of permanent faults for single-phase auto-reclosure on transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 75-81.
- [11] 索南加乐, 邵文权, 宋国兵, 等. 带并联电抗器输电线路永久性故障识别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 80-85.  
SUONAN Jia-le, SHAO Wen-quan, SONG Guo-bing, et al. A new method to identify permanent faults for transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 80-85.
- [12] 索南加乐, 邵文权, 宋国兵. 基于参数识别的单相自适应重合闸研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 48-54.  
SUONAN Jia-le, SHAO Wen-quan, SONG Guo-bing. Study on single-phase adaptive reclosure based on parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 48-54.

收稿日期: 2009-12-03; 修回日期: 2010-02-27

作者简介:

赵庆明 (1975-), 男, 博士, 主要从事电力系统继电保护以及安全稳定方面的研究工作; E-mail: qingmingzhao@eyou.com

李 斌 (1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与故障分析。