

带并联电抗器的超高压输电线路 单相故障性质识别新判据

戚琦, 吕飞鹏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:根据带并联电抗器的超高压输电线路发生瞬时性和永久性单相短路故障时,故障相恢复电压周期性不同特点,提出了通过将间隔半个工频周期的恢复电压瞬时值相加消除工频分量,并应用 Prony 曲线拟合算法获取瞬时性故障时恢复电压自由衰减分量的幅值的方法。应用获得的自由衰减分量幅值区分故障类型。理论分析和仿真实验表明该判据具有较高的可靠性和灵敏度。

关键词:单相自适应重合闸;并联电抗器;超高压输电线路;Prony 曲线拟合

Abstract: According to the different periodicity of recovery voltage in permanent fault and transient fault a novel method to distinguish fault type is proposed. The method eliminates the system frequency component through adding the instantaneous value of recovery voltage at half a cycle interval firstly and then uses Prony fit method to obtain the amplitude of the free decay component of recovery voltage in transient fault. The obtained amplitude can be used to distinguish fault type. Theoretical analysis and simulation results show that the criterion has a higher reliability and sensitivity.

Key words: single-phase adaptive reclosure; shunt reactor; extra-high voltage transmission line; Prony fit

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0016-05

0 引言

自动重合闸技术因其消除瞬时性故障的能力,被广泛应用于输电线路,有效地提高了系统稳定性。然而,当发生永久性故障时,重合闸会导致系统再次受到故障的冲击,降低超高压系统的运行稳定性。为了避免重合闸于永久性故障,自适应重合闸技术被提出并得到了国内外学者大量的研究^[1-9]。

在中国 220 kV 以及以上的电压等级输电线路中,断路器通常都具有分相操作能力。为了提高供电连续性,在线路发生单相故障时,在系统允许范围内可两相运行一段时间。所以单相重合闸广泛应用于超高压线路。

自适应重合闸的核心是区分瞬时性故障和永久性故障。现有故障性质区分的原理大致可以分为基于恢复电压和基于故障电弧瞬时特性两大类。文献[6-9]应用小波或 ANN (artificial neural networks) 技术提取二次电弧电压判断故障特性,算法较复杂且由于故障电弧电压较小具有较强的随机性,在现场使用中的可信度有待验证。

为了限制工频过电压、补偿容性无功和抑制潜供

电流,高压线路通常装有并联电抗器。装有并联电抗器的高压输电线路,瞬时性单相短路故障时恢复电压具有拍频特性^[2];而永久性单相短路故障时恢复电压只含工频分量。应用恢复电压的拍频特性,文献[1]提出了通过积分滤除工频分量判断方法,数据窗与两分量的初相角有关,最短为一个工频周期;文献[3]提出的算法数据窗较长,约为半个拍频周期。文献[4]应用恢复电压工频分量和自由分量具有不同周期性的特点,消除工频分量,数据窗为 2 个工频周期。下面基于恢复电压工频分量和自由分量不同的周期,提出了新判断算法,算法应用 Prony 曲线拟合算法^[11-12]求取自由分量幅值,数据窗在一个工频周期内,且具有较强的抑制噪声能力,灵敏度高,可靠性强。

1 单相故障恢复电压特性

发生单相故障后,故障相断路器断开,健全相继续运行。由于健全相和故障相线路间存在静电耦合和电磁耦合现象,故障相线路上感应出恢复电压。

用 T 型集中参数线路等效分布参数线路,故障相电压分布如图 1 所示。

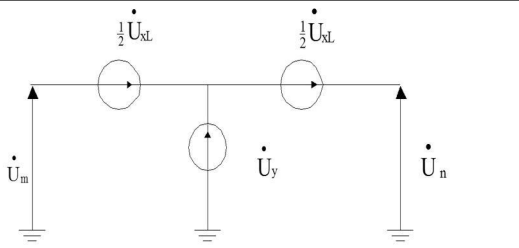


图 1 故障相恢复电压分布

其中, U_y 为静电耦合电压, U_y 与线路长度无关, 是对地电压; U_{kL} 为电磁耦合电压, 与线路长度成正比, 方向是沿导线方向。静电耦合电压和电磁耦合电压的计算方法在文献 [2] 中有详细的推导过程, 限于篇幅, 在此不做赘述。

在装有并联电抗器的超高压线路上, 发生单相瞬时性短路故障时, 潜供电弧彻底熄灭后, 由于线路储能元件能量释放不完全, 恢复电压除了工频分量外, 还包含一个自由衰减分量。发生瞬时性单相短路故障时, 恢复电压可用式 (1) 表示。

$$u_i(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 e^{-t/\tau} \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \quad (1)$$

式中, U_0 、 ω_0 、 Φ_0 和 U_1 、 ω_1 、 Φ_1 分别为工频电压分量和自由电压分量的幅值、角频率和初相角, τ 为自由分量衰减时间常数。自由分量的幅值 U_1 受开关动作和故障位置等因素的影响, 变化较大。大量现场试验表明自由分量幅值通常接近或高于工频分量 [2]。文献 [10] 中给出了自由分量衰减时间常数和自由分量频率的计算方法。计算和实测表明, 自由分量衰减时间常数通常在 1 s 左右, 自由振荡分量频率通常在 30 ~ 40 Hz 左右 [21]。

发生单相永久性接地短路时, 由于故障点一直存在, 线路上的储能元件能迅速释放, 所以永久性故障时恢复电压不含自由振荡分量 [3]。此外, 因为故障点一直存在, 线路对地电容能可靠放电, 所以静电耦合电压可以忽略。恢复电压由电磁耦合电压、故障位置和过渡电阻决定, 可用一个工频量表示。

2 新判据原理

发生瞬时性故障时, 故障相的恢复电压由工频分量和自由衰减分量组成。发生永久性故障时, 故障相的恢复电压仅包含工频分量。根据两种性质故障时, 恢复电压周期性不同的特点, 提出了区分两种性质故障的判据。

忽略自由分量衰减系数, 瞬时性故障时恢复电压瞬时值表达式为

$$u_i'(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \quad (2)$$

式中, U_0 、 ω_0 、 Φ_0 和 U_1 、 ω_1 、 Φ_1 分别为恢复电压和工频分量和自由分量的幅值、角频率和初相角。

间隔一个工频周期的恢复电压差值为

$$\begin{aligned} \Delta u_{i1}' &= u_i'(t) - u_i'(t + T_0) \\ &= U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \\ &\quad - U_0 \sin(\omega_0 t + \omega_0 T_0 + \Phi_0) - U_1 \sin(\omega_1 t + \omega_1 T_0 + \Phi_1) \\ &= -2U_1 \sin(\omega_1 T_0 / 2) \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \omega_1 T_0 / 2 + \pi / 2) \quad (3) \end{aligned}$$

间隔 1/2 工频周期的恢复电压和值为

$$\begin{aligned} \Delta u_{i2}' &= u_i'(t) + u_i'(t + T_0 / 2) \\ &= U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \\ &\quad + U_0 \sin(\omega_0 t + \omega_0 T_0 / 2 + \Phi_0) + U_1 \sin(\omega_1 t + \omega_1 T_0 / 2 + \Phi_1) \\ &= 2U_1 \cos(\omega_1 T_0 / 4) \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \omega_1 T_0 / 4) \quad (4) \end{aligned}$$

其中, $\Delta u_{i1}'$ 和 $\Delta u_{i2}'$ 均为正弦量, 幅值分别为 $2U_1 |\sin(\omega_1 T_0 / 2)|$ 和 $2U_1 |\cos(\omega_1 T_0 / 4)|$, 角频率均为 ω_1 。当 $\omega_1 \neq \omega_0$ 时, $\Delta u_{i1}'$ 和 $\Delta u_{i2}'$ 的幅值均不等于 0。

根据以上分析可知, $\Delta u_{i1}'$ 或 $\Delta u_{i2}'$ 的值是否为 0 可以作为区分瞬时性故障和永久性故障的判据。

3 新判据提出

理论上, 可用特征量的绝对值 $|\Delta u_{i1}'|$ 或 $|\Delta u_{i2}'|$ 的瞬时值作为区分故障性质的判据。以设定采用频率计算特征量, 当特征量的瞬时值大于整定值时, 就判定故障为瞬时性故障。瞬时性故障的特征量是以 $T_1 / 2$ 为周期的周期函数, 所以若 $|\Delta u_{i1}'|$ 作为判断量, 判断最长时间为 $T_0 + T_1 / 2$ 用 $|\Delta u_{i2}'|$ 作为判断量, 则判断最长时间为 $T_0 / 2 + T_1 / 2$ 。但该判据是通过单个时刻的特征量值为依据, 可靠性不足。

文献 [1] 用积分法获得的判据量, 可以理解为是文中 $|\Delta u_{i2}'|$ 一个工频周期的算术平均值。用算术平均值作判断量不及用最大值作判断量灵敏度高。

下面拟用曲线拟合法获取特征量幅值, 用特征值幅值作为判断量。曲线拟合法利用了一段时间的特征量信息, 可抑制噪声信号的影响, 有较高的可靠性。

上一节的分析中, 忽略了瞬时性故障时恢复电压自由分量的时间衰减因子。为了找到最适合的曲线拟合法, 下面用包含时间衰减因子的恢复电压进行分析。

间隔一个工频周期的恢复电压差值为

$$\begin{aligned} \Delta u_{t_1} &= u_t(t) - u_t(t+T_0) \\ &= U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \\ &\quad - U_0 \sin(\omega_0 t + \omega_0 T_0 + \Phi_0) - U_1 e^{-\frac{t+T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \omega_1 T_0 + \Phi_1) \\ &= U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \left[\sin(\omega_1 t + \Phi_1) - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \omega_1 T_0 + \Phi_1) \right] \\ &= U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \left\{ \sin(\omega_1 t + \Phi_1) - \left[e^{-\frac{T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \cos(\omega_1 T_0) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 t + \Phi_1) \sin(\omega_1 T_0) \right] \right\} \\ &= U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \left\{ \left[1 - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0) \right] \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \right. \\ &\quad \left. - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 T_0) \cos(\omega_1 t + \Phi_1) \right\} \\ &= U_1 \sqrt{\left[1 - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0) \right]^2 + \left[e^{-\frac{T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 T_0) \right]^2} \\ &\quad \times e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \psi) \\ &= U_1 \sqrt{1 + e^{-\frac{2T_0}{\tau}} - 2e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0)} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \psi) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

$$\psi = -\arctan \left[\frac{e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0)}{1 - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0)} \right] \quad (6)$$

同理可推导出间隔 1/2 工频周期的恢复电压和值为

$$\begin{aligned} \Delta u_{t_2} &= u_t(t) + u_t(t+T_0/2) \\ &= U_1 \sqrt{1 + e^{-\frac{2T_0}{\tau}} + 2e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0/2)} \\ &\quad \times e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \psi) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,

$$\psi = \arctan \left[\frac{e^{-\frac{T_0}{2\tau}} \sin(\omega_1 T_0/2)}{1 + e^{-\frac{T_0}{2\tau}} \cos(\omega_1 T_0/2)} \right] \quad (8)$$

可见 Δu_{t_1} 和 Δu_{t_2} 均是含有衰减因子的正弦量。

综合比较各种曲线拟合算法,发现用 Prony 算法拟合包含衰减因子的正弦量模型,能在较短的时间内得到较精确的上述特征量幅值。

4 Prony 曲线拟合算法简介

Prony 曲线拟合算法用一组含衰减因子的余弦量拟合信号数据。设信号 $x(n)$ 的 P 阶 Prony 模型如下式所示。

$$x(n) = \sum_{i=1}^P b_i z_i^n \quad (n=0, 1, \dots, N-1) \quad (9)$$

$$b_i = A_i \exp(j\theta_i) \quad (10)$$

$$z_i = \exp[(\delta_i + j2\pi f_i)\Delta t] \quad (11)$$

其中, A_i 为幅值; θ_i 为初相位; δ_i 为衰减因子; f_i 为频率; Δt 为采样间隔。

Prony 模型参数计算分为两步,首先计算衰减因子和频率,再计算幅值和初相位。

(1) 计算衰减因子和频率

用信号采样值,构造如下方程组。

$$\begin{bmatrix} x(p-1) & x(p-2) & \dots & x(0) \\ x(p-0) & x(p-1) & \dots & x(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(N-2) & x(N-3) & \dots & x(N-p-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(p+0) \\ x(p+1) \\ \dots \\ x(N-1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

当 $N > 2p$ 时,该线性方程组的解取最小二乘解。用该线性方程组的解 $[a_1, a_2, \dots, a_p]^T$ 构建多项式方程得

$$z^p - (a_1 z^{p-1} + a_2 z^{p-2} + \dots + a_p) = 0 \quad (13)$$

将该多项式方程在复数域的解代入式 (14) 可以计算出 Prony 模型中的衰减因子和频率。

$$\begin{cases} \delta_i = \ln |z_i| / \Delta t \\ f_i = \frac{\arctan[\operatorname{Im}(z_i) / \operatorname{Re}(z_i)]}{2\pi \Delta t} \end{cases} \quad (14)$$

(2) 计算幅值和初相位

用步骤 (1) 的多项式方程的解和采用数据构造如下方程组。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z & z & \dots & z \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z^{N-1} & z^{N-1} & \dots & z^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \dots \\ x(N-1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

当 $N > 2p$ 时,该线性方程组的解取最小二乘解。将该方程组在复数域的解代入式 (16) 可以计算出 Prony 模型中的幅值和初相位。

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan[\operatorname{Im}(b_i) / \operatorname{Re}(b_i)] \end{cases} \quad (16)$$

由上节推导可知,特征量 Δu_{t_1} 和 Δu_{t_2} 可以用一阶 Prony 模型拟合。为了抑制信号中的噪声,提高计算精度,实际应用中数据采样频率不应低于 1 kHz,采样数据窗设为一个工频周期。数据采样频率越高,计算结果可靠性越高。

5 判据灵敏性分析

瞬时性故障特征量 Δu_1 和 Δu_2 的幅值都是自由分量频率 f 和衰减时间常数 τ 的函数。为了便于分析,取衰减时间常数 τ 为定值 1 s 。当 $0 < f < f_1$ 时, u_1 的幅值大于 0, 且以近似正弦规律变化。设 u_1 的幅值为 $k_1 U_1$, u_2 的幅值为 $k_2 U_1$ 。 k_1 和 k_2 随 f 变化的曲线如图 2 所示。

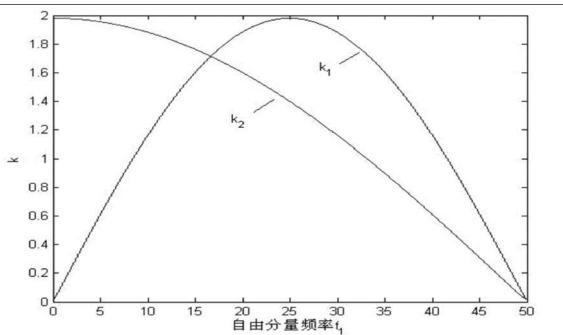


图 2 k 随自由分量频率变化的曲线

当 $25\text{ Hz} < f < 50\text{ Hz}$ 时, Δu_1 和 Δu_2 单调递减。当 $f = 49\text{ Hz}$ 时, $k_1 = 0.1259$ 。当 $0 < f < 50\text{ Hz}$ 时, Δu_1 单调递减。当 $f = 49\text{ Hz}$ 时, $k_2 = 0.0653$ 。当 $25\text{ Hz} < f < 50\text{ Hz}$ 时, k_1 和 k_2 相差不大, 都有足够的灵敏度。由于获取 Δu_2 幅值的数据窗较 Δu_1 短 $T_0/2$, 所以选择 Δu_2 的幅值作为判断量。

6 整定计算与故障性质判断流程

实验和计算表明瞬时性故障时恢复电压自由分量的频率在 $30 \sim 40\text{ Hz}$ ^[2], 所以整定值可以用频率为 49 Hz 时 k_2 的值计算。整定值计算表达式为

$$U_{DZ} = k_2 \times U_1 \quad (17)$$

式中, U_1 为最大负荷条件下两相运行时故障相恢复电压的工频分量幅值。

该判据必须用于二次电弧熄灭后。为了提高判据可靠性,判断流程中通过连续两次的采样数据计算结果判断故障性质。具体判断流程如图 3 所示。

7 实例系统仿真和结果分析

7.1 仿真模型参数

为了验证以上判据的有效性,应用 Matlab/Simulink 对重庆市万县至龙泉 500 kV 输电系统^[3]进行了

仿真。模型如图 4 所示。输电系统参数如下。M 端系统: $X_{m1} = 49.34\ \Omega$, $X_{m0} = 41.34\ \Omega$ 。N 端系统: $X_{n1} = 46.03\ \Omega$, $X_{n0} = 103.36\ \Omega$ 。输电线路参数: $R_1 = 0.0195\ \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.1675\ \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.9134\ \text{mH}/\text{km}$, $L_0 = 2.719\ \text{mH}/\text{km}$, $C_1 = 0.014\ \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0 = 0.00834\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。并联电抗器电抗 $X_L = 1680.56\ \Omega$ 。中性点电抗 $X_N = 434\ \Omega$ 。

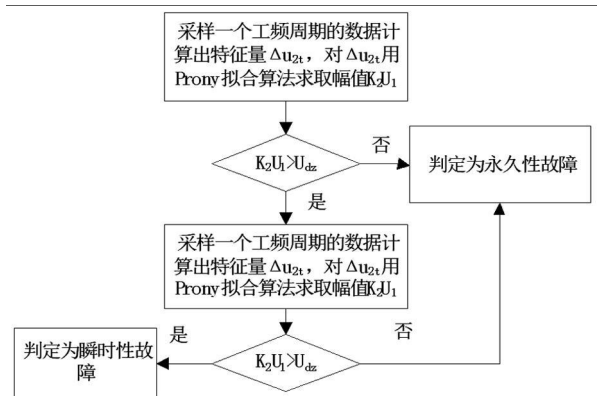


图 3 故障性质判断流程

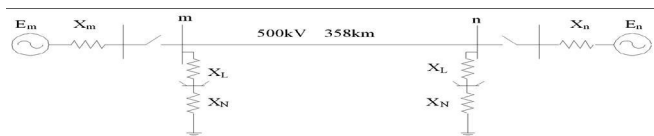


图 4 500 kV 输电系统

7.2 仿真结果及分析

针对图 4 系统,分别对在线路不同位置和不同过渡电阻发生单相短路永久性故障和发生瞬时性故障进行了大量的仿真。表 1 列出了部分仿真结果数据。数据表明,当发生永久性故障时,应由所提出算法连

表 1 仿真结果

故障位置 / %	过渡电阻 / Ω	第一次计算 Δu_2 幅值	第二次计算 Δu_2 幅值	整定值 / kV	故障性质判断结果
20	0	0.216 3	0.212 5	3.983 3	永久
	100	0.011 6	0.011 4	3.983 3	永久
	200	0.006 2	0.006 1	3.983 3	永久
	500	0.000 1	0.000 1	3.983 3	永久
	瞬时	11.326 3	11.143 2	3.983 3	瞬时
	50	0	0.184 4	0.177 5	3.983 3
100		0.000 3	0.000 3	3.983 3	永久
200		0.000 2	0.000 2	3.983 3	永久
500		0.000 1	0.000 1	3.983 3	永久
瞬时		11.613 7	11.516 3	3.983 3	瞬时
70		0	0.175 7	0.168 2	3.983 3
	100	0.000 1	0.000 1	3.983 3	永久
	200	0.000 1	0.000 1	3.983 3	永久
	500	0.000 1	0.000 1	3.983 3	永久
	瞬时	11.428 3	11.343 5	3.983 3	瞬时

续两次计算得到的 Δu_{t_i} 的幅值均远小于整定值;而当发生瞬时性故障时,连续两次计算得到的 Δu_{t_i} 的幅值均大于整定值。根据判断流程,故算法可以可靠地判断故障性质。

8 结 论

根据带并联电抗器的超高压输电线路发生瞬时性和永久性单相短路故障时,故障相恢复电压周期性不同特点,提出了提取瞬时性故障时恢复电压自由分量的算法,并应用 Prony 曲线拟合算法在短数据窗内获取自由分量的幅值,作为判断故障性质的依据。该判据具有简单、数据窗短、灵敏度高和基本不受系统运行方式、故障位置、过渡电阻和负荷电流的影响的优点。

参考文献

[1] 曹芬,何奔腾.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸新算法 [J].电力系统自动化,2009,33(23):55-59.

[2] 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,2007.

[3] 李斌,李永丽,盛鹏,等.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究 [J].中国电机工程学报,2004,24(5):52-56.

[4] 刘浩芳,王增平,徐岩,等.带并联电抗器的超特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据 [J].电网

技术,2006,30(18):30-34.

[5] Ge Yaosheng Sui Fonghai Xiao Yuan Prediction Methods for Preventing Single-phase Reclosing on Permanent Fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.

[6] Fitton D S, W Dunn R, Aggarwal R K, et al. Design and Implementation of an Adaptive Single Pole Autoreclosure Technique for Transmission Lines Using Artificial Neural Networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 748-756.

[7] Aggarwal R K, Johns A T, Song Y H, et al. Neural-network Based Adaptive Autoreclosure Technique for EHV Transmission systems [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 155-160.

[8] 蔡超豪.基于小波分析的自适应重合闸 [J].继电器,1999,27(2):21-23.

[9] 成敬周,张举.基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸 [J].继电器,2005,33(7):21-25,49.

[10] 舒亮,贾磊,郑士普,等.超高压线路潜供电弧电压的频率特性分析.西安交通大学学报,2007,41(6):712-716

[11] J F Hauer C J Demeure L L Scharf Initial Results in Prow Analysis of Power System Response Signals [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1990, 5(1): 80-89.

[12] 伍凌云,李兴源,孙衢,等.基于 Prony 辨识的复杂交直流系统次同步振荡特性分析 [J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(3):155-160.

(收稿日期:2010-09-15)

(上接第 7 页)

根据唯一稳态消谐法基本思想,利用向量比较原理,分析了消除中性点接地电力系统的铁磁谐振的参数条件,得到了相应的消谐条件。同时通过数值模拟进行验证,表明结果正确,同时也说明唯一稳态消谐法的有效性。

参考文献

[1] 解广润.电力系统过电压 [M].北京:水利电力出版社,1985.

[2] 张纬敏,高玉明.电力系统过电压与绝缘配合 [M].北京:清华大学出版社,1988.

[3] 郑盛琼,陈维贤,鲁铁成.110~220 kV 变电所中互感器引起的铁磁谐振及吸能消谐 [J].高压电器,1996,18(6):26-30.

[4] T. Henriksen How to Avoid Unstable Time Domain Responses Caused by Transformer Models [J]. IEEE Trans

on Power Delivery, 2002, 17(2): 516-522.

[5] 李兴斌,王晨新.断路器均压电容引起的铁磁谐振分析 [J].东北电力技术,1994,24(9):39-43.

[6] 贾红琴.电磁式 PT 所致铁磁谐振过电压分析及抑制 [J].高电压技术,2000,43(1):69-70.

[7] 石峰.110~220 kV 变电站空母线铁磁谐振的分析 [J].湖南电力,2001,15(1):14-16.

[8] Yunge Li Wei Shi A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral-grounded Substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 1009-1014.

[9] 冯平,王尔智.中性点接地电力系统三相铁磁谐振理论分析 [J].电工技术学报,2004,23(4):35-39.

[10] 尤秉礼.常微分方程补充教程 [M].北京:人民教育出版社,1981.

[11] 冯平.一种混沌分析与抑制方法及其在电力系统铁磁谐振中的应用 [D].沈阳:沈阳工业大学博士论文,2010.

[12] 杨开宇.矩阵分析 [M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1988.

(收稿日期:2010-10-12)