

# 电容式电压互感器暂态响应的数字仿真研究

郁惟镛 吴小建 上海交通大学电力工程系 (200240)

**【摘要】** 本文对电容式电压互感器(CVT)的暂态特性进行了数字仿真,并对影响 CVT 暂态特性的各种因素进行了分析,研究了 CVT 的暂态响应过程给基于全波傅氏算法的微机保护带来的影响,同时对超高压输电线中串补电容的投入对 CVT 暂态响应的影响进行了分析研究。

**【关键词】** 电容式电压互感器 暂态响应 全波傅氏算法 串补电容

## 0 引言

在超高压输电线路路上,由于技术和经济的原因,一般采用 CVT 来作为继电保护装置的电压变换元件。这种电压互感器暂态响应特性差,保护出口处一次侧发生短路时,二次电压要经过一定的延时才能下降到零。由于超高压电网的重要性,当系统发生故障时,一般要求继电保护在 1~2 个周波内准确动作,CVT 的暂态响应有可能使继电保护延缓动作或误动作,因而改善 CVT 的暂态响应特性对提高超高压输电系统的动态稳定及保护电力系统安全可靠运行具有重要的技术经济意义。

## 1 CVT 的等值电路

CVT 等值电路如图 2 所示,  $U_1, C_e$  为等效电源电压和等效电容,  $R_m, L_m$  为中压变压器励磁支路等值电阻和电感,  $R_b, L_b$  为负荷支路的电阻和电感,  $L_1$  为中压变压器一次绕组的漏感和补偿电抗器的电感之和,  $R_1$  为变压器一次绕组和补偿电抗器绕组的直流电阻以及电容器的等值电阻之和,  $r_f, L_f$  为谐振电抗器的直流电阻和电感,  $C_f$  为谐振电容,  $R_f$  为阻尼电阻。

## 2 中压变压器励磁支路的模拟

中压变压器的励磁支路具有很强的非线性,在工程计算中,一般用非线性电感电压和电流的有效值来表示非线性电感的磁化特性

$I(\theta)$ ,利用变换的方法,由伏安特性近似推出磁化特性。

非线性电感的伏安特性可用下列多项式来表示:

$$I = a_1 U + a_3 U^3 + a_5 U^5 \quad (1)$$

式中,  $a_1, a_3, a_5$  为待定系数,利用中压变压器的空载实验数据,采用最小二乘法来进行分段拟合。令  $X_k = U^{2k-1}$ ,则参数估计值为:

$$A = (X^T X)^{-1} X^T \cdot I \quad (2)$$

不考虑剩磁,则非线性电感的磁化曲线也可以用下列多项式函数来表示:

$$i = b_1 + b_3 i^3 + b_5 i^5 \quad (3)$$

若加入非线性电感的电压为  $U(t) = U_m \sin t$ ,则磁链为:

$$\psi(t) = -\frac{1}{\omega} U_m \cos t \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式,并将瞬时值转换为有效值,可得:  $b_1 = a_1, b_2 = \frac{2}{3} a_3^3, b_5 = \frac{2}{5} a_5^5$ ,由此就可得到中压变压器励磁电感的磁化特性(3),为了保证各段之间能平滑连接,每段之间有 3 点重合。

## 3 CVT 暂态仿真模型

由图 2 所示的 CVT 的等值电路,可以得到相应的状态方程:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1} [U_1 - U_{ce} - U_{cf} - R_1 i_1 - R_f (i_1 - i_b) - b_1 - b_3 i_1^3 - b_5 i_1^5] \quad (5)$$

1997-09-18 收稿

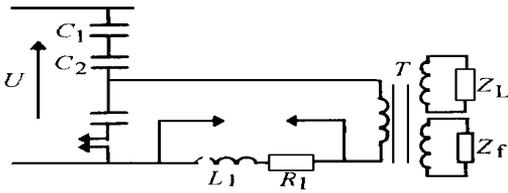


图1 CVT原理图

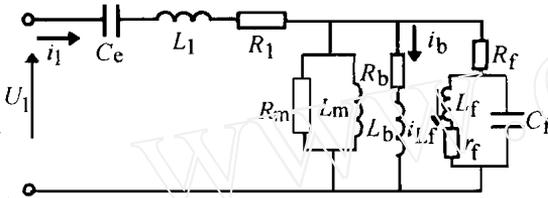


图2 CVT等值电路

$$\frac{dU_{ce}}{dt} = \frac{i_1}{C_e} \quad (6)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_b} [U_{cf} + R_f(i_1 - i_b - b_1 - b_3 - b_5) - R_b i_b] \quad (7)$$

$$\frac{dU_{cf}}{dt} = \frac{1}{C_f} (i_1 - i_b - i_{lf} - b_1 - b_3 - b_5) \quad (8)$$

$$\frac{di_{lf}}{dt} = \frac{1}{L_f} (U_{cf} - r_f i_{lf}) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} = U_{cf} + R_f(i_1 - i_b - b_1 - b_3 - b_5) \quad (10)$$

上列常系数微分方程组可采用四阶龙格—库塔法求解。

#### 4 影响 CVT 暂态响应的因素

CVT同电磁式电压互感器相比,其谐振回路的谐振电容  $C_f$  和谐振电感  $L_f$  作为储能元件,存储了整个 CVT 电路的大部分能量,经过计算,其储能占总电路能量的 80% ~ 90% 之多,因此其暂态特性较差,当一次系统发生短路后, CVT 的输出电压波形不能及时地反映一次侧电压变化,影响因素主要有以下几种。(图 3 ~ 8 中电压均为幅值,且都是二次侧电压,额定有效值为 100V)。

##### 4.1 短路电压相角 的影响

图 3 为在不同的短路电压相角 下, CVT 的暂态输出波形,从图中可以看出,在  $\alpha = 0^\circ$

时, CVT 的输出电压衰减最慢,而且在 5 ~ 30ms 内,输出的电压幅值大于其它角度下短路的值,因而对继电保护的影响最大。

##### 4.2 等效电容 $C_e$ 的影响

为了保证 CVT 的精度一般补偿电抗  $X_{L1}$  应该满足  $X_{L1} = K(X_{ce} - X)$ , 其中,  $X$  为中间变压器的等效电抗,  $K$  为补偿系数,通常  $K$  稍大于 1,  $C_e$  变化  $L_1$  也要随之变化  $C_e$  变大时,使得谐振阻尼器吸收的能量减少, CVT 的暂态输出电压变小,但是,其延时时间增大,如图 4 所示。

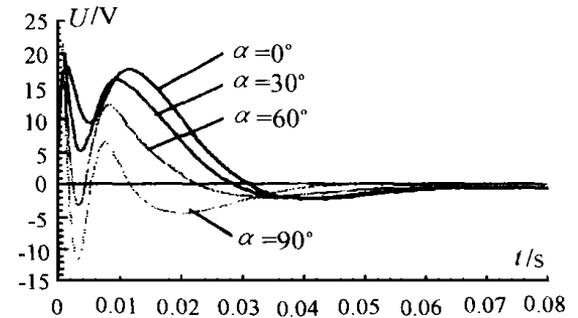


图3 短路相角对 CVT 暂态特性的影响

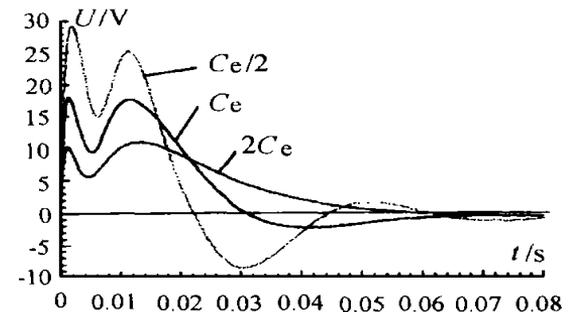


图4 分压电容  $C_e$  对 CVT 暂态特性的影响

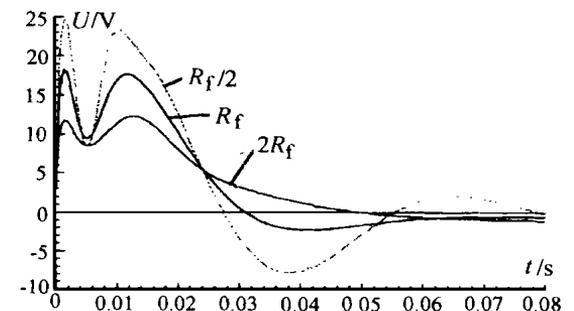


图5  $R_f$  对 CVT 暂态特性的影响

##### 4.3 谐振阻尼器的影响

为了消除谐波谐振, CVT 一般均有谐波阻

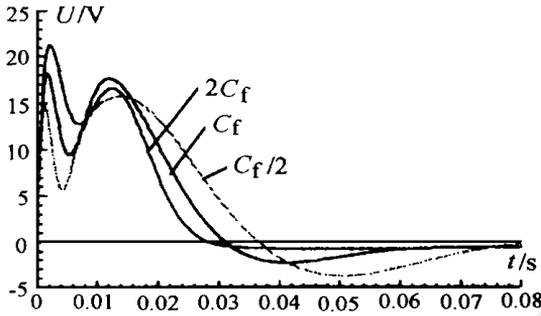


图6  $C_f$  对 CVT 暂态特性的影响

尼器,工频下不发生谐振,对 CVT 相当于开路,系统故障时,对产生的高频分量呈现感抗形式,相当于增加了 CVT 的电感,对暂态响应特性不利。而谐振阻尼器存储了 CVT 电路中大部分的能量,对 CVT 的暂态响应过程起着十分重要的作用。图 6 和图 7 是短路电压相角  $= 0$  时,不同的  $R_f$  和  $C_f$  所对应的 CVT 的输出电压波形。(因  $L_f$  和  $C_f$  必须满足  $^2 L_f C_f = 1$ ,故只讨论  $C_f$  的影响)。

由图 5 和图 6 可以看出:

(1) 增大电阻  $R_f$ ,可使 CVT 暂态输出电压幅值相应减小,因为  $C_f$  和  $R_f$  上的电压相位差接近  $180^\circ$ ;

(2) 减少谐振电容  $C_f$ ,可以使 CVT 暂态输出电压波形相应减小,但是延时增大。

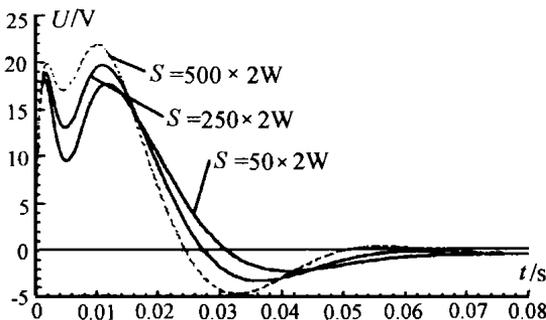


图7 负荷容量  $S$  对 CVT 暂态特性的影响

#### 4.4 负荷的影响

##### 4.4.1 负荷容量的影响

负荷大小决定了线路中的电流和等效电容  $C_e$  上的电压,影响了场能的存储,同时也改变了电路的时间常数,这些对 CVT 的暂态特性都有影响。从图 8 可以看出,负荷容量增大时,动态储能元件  $L_f$  和  $C_f$  的储能增加,暂态响应输出

电压的幅值也随之增大。

##### 4.4.2 功率因数 $\cos$ 的影响

当负荷容量较小时,  $\cos$  对 CVT 的暂态响应影响不大,这是因为负荷较小时,负载支路的电阻和电感较大,故影响较小,当负荷容量增大时,功率因数对暂态过程产生显著影响。

图 8 是  $= 0^\circ, S = 200 \times 2W$  时  $\cos$  对 CVT 暂态特性的影响,从图 8 可以看出,  $\cos$  减小时,电阻减小,电感增大,一方面增加了负载支路的储能,另一方面也增加了负载支路的振荡作用,使得 CVT 的电压输出幅值增大,恶化了其暂态特性。

#### 5 CVT 暂态特性对基于全波傅氏算法的微机保护的影响

微机保护在电力系统中得到越来越多的应用,其算法有多种多样, CVT 对其影响不尽相同,下面仅对基于全波傅氏算法的微机保护进行讨论,主要讨论在不同的条件下,全波傅氏算法的基波幅值及其误差的各种不同状况。

在微机保护中,一般把电流和电压信号中的基波分量作为有效分量来利用,基波分量的傅氏余弦系数和正弦系数分别为:

$$U_C = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} U(t) \cos \omega t dt$$

$$U_S = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} U(t) \sin \omega t dt \quad (11)$$

对上面两式进行积分离散化,设每周采样  $N$  点,则第  $K$  次采样时,电压基波分量的傅氏余弦系数和正弦系数分别为:

$$U_C = \frac{2}{N} \sum_{m=1}^N U(K - N + m) \cos \left( \frac{2\pi}{N} \cdot m \right) \quad (12)$$

$$U_S = \frac{2}{N} \sum_{m=1}^N U(K - N + m) \sin \left( \frac{2\pi}{N} \cdot m \right) \quad (13)$$

电压基波分量写成复数形式为:

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} (U_C + jU_S) \quad (14)$$

下面考虑由于 CVT 暂态残压所造成的基波幅值的附加误差。

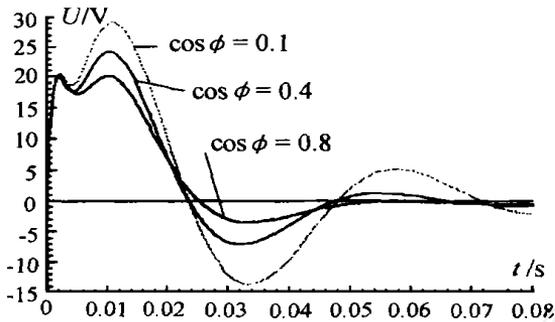


图8 功率因数对 CVT 暂态特性的影响

仿真结果表明,在稳态情况下,一二次侧电压全波傅氏算法的基波幅值误差可以认为是零。假设  $t = 0$  时 CVT 出口处发生故障,一次侧电压为零,由式(12)可以看出,所造成的傅氏余弦分量的误差为:

a. 当  $K < N$  时,  $U_C(K) =$

$$\frac{2}{N} \sum_{m=0}^K U(m) \cos \frac{2\pi}{N} (K - N + m) \quad (15)$$

b. 当  $K > N$  时,  $U_C(K) = \frac{2}{N} \sum_{m=1}^N U(K - N + m) \cos \left( \frac{2\pi}{N} \cdot m \right) \quad (16)$

同样,可以求出正弦系数的误差  $U_S(K)$ 。

## 5.1 仿真系统图

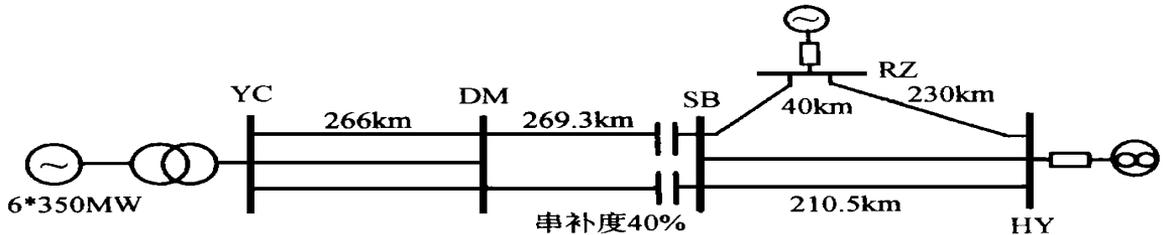


图9 某电力系统网络简化图

## 5.2 仿真结果分析

### 5.2.1 CVT 电路参数的影响

图 10 ~ 13 为短路相角为零,串补电容未投入,短路发生在保护出口处,不同的  $C_e$ 、 $R_f$ 、 $C_f$  和负荷容量  $S$  所对应的全波傅氏算法电压基波分量的计算误差  $U$ ,由图可以看出:

(1) 增大谐波阻尼器的动作  $R_f$ ,增大等效电容  $C_e$ ,减小负荷容量  $S$ ,将有助于减小由于 CVT 暂态残压所造成的基波电压幅值的计算误差。

(2) 减小  $C_f$  虽然可以减小基波幅值的计算

误差,但却增加了延时。

### 5.2.2 故障地点的影响

图 14 为在不同的短路点所对应的全波傅氏算法基波幅值的计算误差(其它短路条件同 10 ~ 13),从图中可以看出,CVT 暂态过程对远距离故障(母线处残压较高)的对应基波分量计算影响较小,这是因为故障电阻同电源联系阻抗相比较,母线电压下降不大,因而 CVT 二次电压暂态分量较小,基波分量较大。若故障点距离保护安装处较近,则情况正好相反。

### 5.2.3 串补电容投入的影响

在有串补电容投入的线路中,当系统在串补电容前方发生故障时,由于串补电容的影响,在电压和电流信号中引入了较大的低频分量,该低频分量的频率一般在 25 ~ 50Hz 之间。同时由于串补电容两端一般都装有过电压保护,其  $Z_n O$  避雷器或保护间隙的动作使故障时串补电容部分或全部推出运行,从而在故障系统中引入了大量的暂态分量,恶化了 CVT 的暂态转变过程。图 15 和图 16 分别是串补电容前方发生故障,经过 CVT 转变后所计算的保护安装处的基波电压的有效值和幅值计算误差。

由图可以看出,串补电容的投入加剧了 CVT 的暂态过程,使得全波傅氏算法计算的电压基波分量误差增大(约为无串补电容的 2 倍),同时由于 CVT 延时的影响,使得基波幅值误差趋于较大的非零值,从而给继电保护的准确动作带来了不利影响。

## 6 结论

(1) 当电力系统一次侧发生故障时,CVT 二次侧电压响应波形不能按比例地反映一次系统电压的暂态过程,其暂态过程受 CVT 电路参

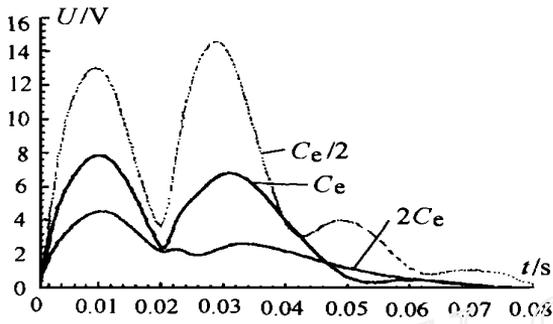


图10  $C_e$  对全波傅氏算法基波幅值的影响

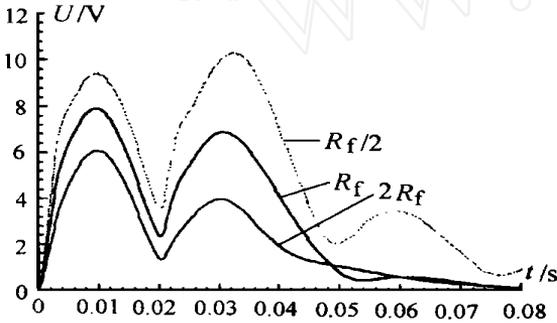


图11  $R_f$  对全波傅氏算法基波幅值误差的影响

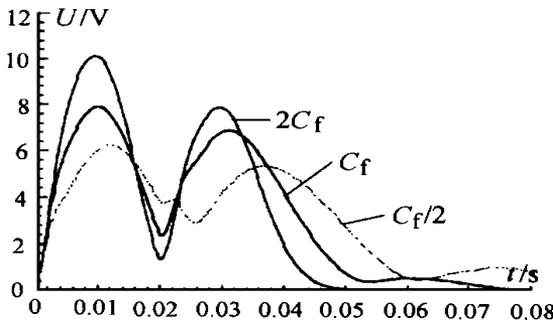


图12  $C_f$  对全波傅氏算法基波误差的影响

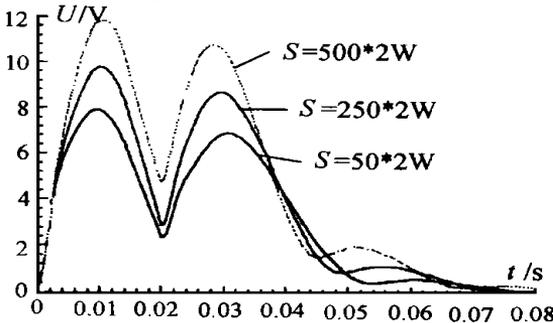


图13  $S$  对全波傅氏算法基波幅值误差的影响数及匹配关系. 短路电压相角、二次侧负荷容量和功率因数的因素的影响;

(2) CVT 暂态输出电压对全波傅氏算法将

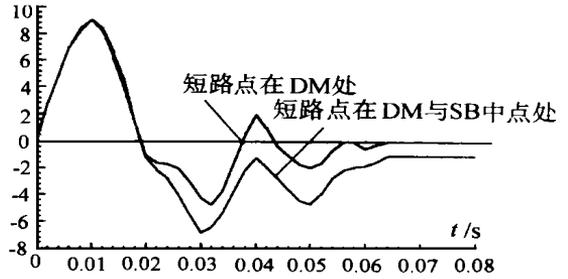


图14 不同短路点傅氏全波算法基波分量的计算误差

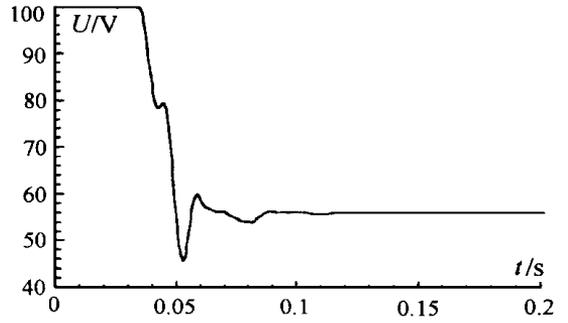


图15 串补电容前方故障,傅氏全波算法基波有效值曲线 (短路时间  $t = 0.35s$ )

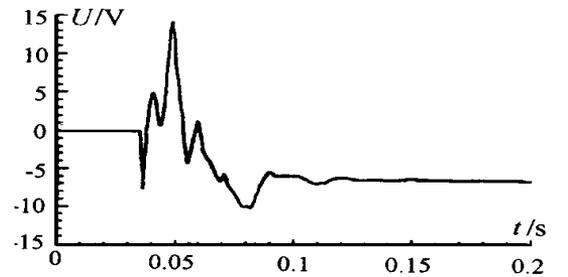


图16 串补电容前方故障全波傅氏算法基波分量计算误差 (短路时间  $t = 0.35s$ )

产生比较大的基波电压幅值误差(最大超过10%),这对保护的正常动作带来不利影响;

(3) 超高压输电电网中的串补电容的投入加剧了CVT的暂态响应特性,增大了全波傅氏算法中基波分量的幅值计算误差,从而增加了保护的负担。

参考文献

- 1 王德忠. 电容式电压互感器瞬变响应特性的研究. 电力电容器, 1994. 3, P1 ~ 7
- 2 任桂英, 刘宗歧等. 电力系统故障时 CVT 响应的研究. 华北电力学院学报, 1995. 4, Vo122. P35 ~ 40
- 3 A. Swetaa. Transient Response Characteristics of ca

capitive potential Devices. Electric Energy conference , 1989

4 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 水利电力出版社, 1992

## DIGITAL SIMULATION RESEARCH ON TRANSIENT RESPONSE OF CVT

*Yu Weiyong, Wu Xiaojian* (Shanghai Traffic University, 200240, China)

**Abstract** The transient characteristics of CVT is digitally simulated in this paper. Different factors related to the transient characteristic of CVT are analyzed and the influence of CVT transient response process on the microprocessor - based protection basing on the full - wave Fourier algorithm is researched. Meanwhile, the influence of the series - compensation capacitors put on UHV transmission line to the transient response of CVT is analyzed and researched.

**Keywords** CVT transient response full - wave fourier algorithm series - compensation capacitor

(上接 26 页)

## A UNIFIED METHOD FOR CALCULATING FAULTS IN POWER SYSTEM WITH SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS

*Cao Guochen* (Harbin Institute of Technology, 15001, China)

*Zou Chunjie* (Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 132012, China)

**Abstract** In this paper, any type of faults (simple or complex) in power system with Superconducting Fault Current Limiters (SFCL) are modeled as symmetrical or asymmetrical modifications to each original sequence networks. Based on the compensation method, by using the phase - sequence parameter transformation technique and the multi - dimensional Thevenin theorem, a unified method is presented for fast calculation of any fault in power system with SFCL. This method can be adaptable to the network changes in topology caused by faults and SFCL. The method has been proved to be fast and accurate by a numerical example.

**Keywords** Surperconducting fault current limiters power system fault calculation compensation method phase - sequence parameter transformation technique

(上接 21 页)

时刻的捕捉方法。

(4) 仿真计算表明按最佳重合时机重合可以在相同的潮流方式下极大地提高暂态稳定裕度, 在最后一次操作后相同的功角摇摆程度下大幅度提高网络传输能力和暂稳极限。

### 参考文献

1 张保会、袁越、薄志谦. 最佳重合时间及其整定

计算. 中国电力, No. 2, 1995

2 张保会、康小宁、薄志谦. 发电厂送出线重合闸时机的优选与捕捉. 中国电机工程学报, No. 3, 1995

3 王梅义等. 超高压电网继电保护运行技术. 水电出版社, 1984

4 谢宝炎等. 全国电网稳定会议选集. 电网技术, No. 3 ~ No. 4, 1983

5 葛耀中. 单相重合闸过程中瞬时性与永久性故障的差别. 西安交通大学学报, No. 2, 1984

## OPTIMIZING THE RECLOSING TIME TO IMPROVE THE TRANSMISSION CAPACITY OF POWER NETWORK

*Zhang Baohui, Lei Min, Yuan Yuchun* (Xian Traffic University, 710049, Xian, China)

**Abstract** The influence of reclosing time on power system stability is discussed in this paper, the mathematical model is also established for analysis of the influence. Transient energy function is applied to determine the optimal reclosing time. The method in this paper set up a theoretical foundation for analysis of the optimal reclosing time.

**Keywords** stability reclose optimal time