

# 特高压电流差动保护方案研究

桑丙玉, 喻 奇

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:**特高压 1000 kV 输电线路分布电容更大, 由分布电容引起的暂态电容电流对线路的保护影响更大, 因此研究 1000 kV 输电线路的特点及暂态过程对保护的影响很重要。分析了 1000 kV 输电线路的特殊性, 给出了暂态电压电流的仿真波形, 介绍了基于不同电容电流补偿方法的线路差动保护判据, 通过分析和大量的仿真验证了几种判据在 1000 kV 输电线路中应用的优缺点及需要注意的问题, 为特高压输电线路电流差动保护方案提供一定的参考。

**关键词:**特高压; 暂态; 电容电流; 差动判据

**Abstract:** The 1000 kV UHV transmission line has a bigger distributed capacitance and the transient capacitance current caused by distributed capacitance influences the line current differential protection greatly. So it is important to research the characteristics of 1000 kV transmission line and the influence of transient process on the protection. The particularity of 1000 kV transmission line is analyzed and the transient  $V/I$  simulation waveform is presented. The differential protection criterions based on different capacitance current compensation are introduced. The strong points and disadvantages of each criterion are validated as well as the problems needing attention in a 1000 kV simulation model through the analyses and simulations. The results give a reference for the current differential protection scheme of UHV transmission line.

**Key words:** UHV; transient; capacitance current; differential criterion

**中图分类号:** TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0024-05

## 0 引 言

超(特)高压长线的分布电容电流一直是影响电流差动保护性能的主要因素<sup>[1,2]</sup>, 随着中国晋东南—荆门 1000 kV 特高压线路的出现, 这个问题更突显出。许多文献<sup>[3,4,5,6]</sup>提出了电容电流补偿方法和差动保护判据, 这些方法在 1000 kV 特高压输电线路中的应用需要进一步研究。

文章分析了 1000 kV 输电线路的特点, 用 EMT-DC 建立了 1000 kV 分布参数线路模型, 仿真分析了线路的暂态过程。对几种典型的电流差动保护判据进行分析和仿真比较, 指出各自的优缺点和实际应用中要注意的问题, 为研究特高压输电线路电流差动保护提供一定的参考价值。

## 1 1000 kV 特高压输电线路的特殊性

1000 kV 特高压输电线路阻抗角与分布电容显著增大, 使得 1000 kV 输电线路故障时暂态过程更加严重。电感和电容都是储能元件, 当线路故障或是系统

操作使其工作状态发生改变时, 其储存能量将释放、转换即产生过渡过程。如若电源继续供电, 暂态电流将由工频分量和以系统自振频率振荡的自由分量叠加而成。图 1、2 给出了线路空载合闸和区外故障的暂态电流波形; 图 3 给出了区内故障的暂态电流波形。

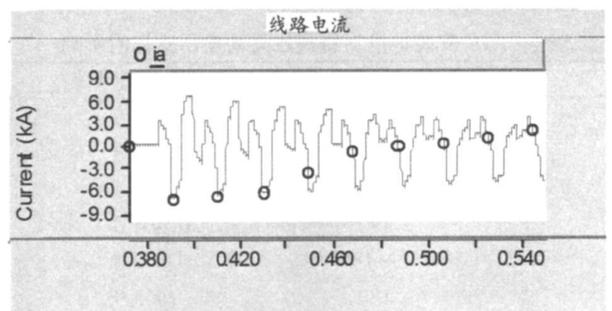


图 1 空载合闸时暂态电流

特高压线路暂态电流中谐波含量高, 非周期分量且衰减缓慢, 会影响工频量的正确提取, 从而影响基于工频量保护的可靠性和动作速度。

## 2 基于稳态补偿的差动判据

特高压长线若只研究线路两端电流、电压关系

时,可以利用二端口集中参数模型。图 4 所示为特高压长线  $\pi$  型等效网络图。

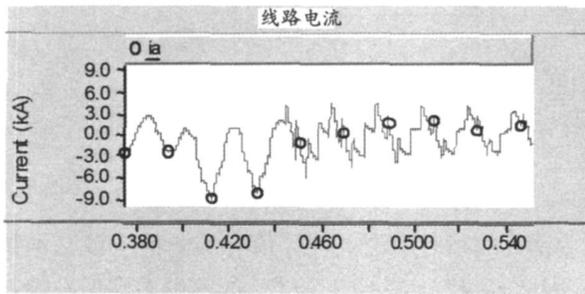


图 2 区外故障暂态电流

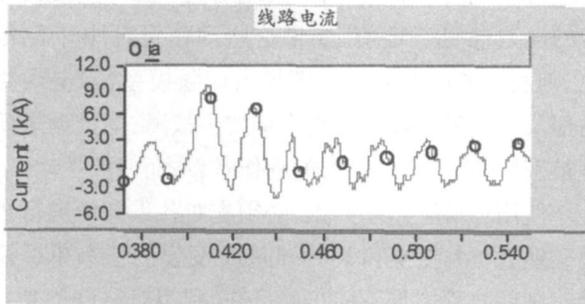


图 3 区内故障暂态电流

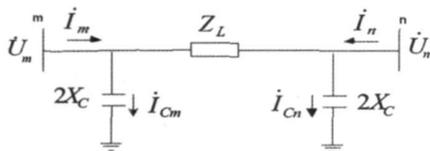


图 4 特高压长线  $\pi$  型等效网络

稳态补偿的电容电流计算如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{Cm} = \frac{\dot{U}_m - \dot{U}_{m0}}{-j2X_{C1}} + \frac{\dot{U}_{m0}}{-j2X_{C0}} \\ \dot{I}_{Cn} = \frac{\dot{U}_n - \dot{U}_{n0}}{-j2X_{C1}} + \frac{\dot{U}_{n0}}{-j2X_{C0}} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\dot{U}_m$ 、 $\dot{U}_n$  为线路两端电压;  $\dot{U}_{m0}$ 、 $\dot{U}_{n0}$  为零序电压;  $X_{C1}$ 、 $X_{C0}$  为线路的正序和零序容抗。

常规相量差动经稳态补偿后的判据为

$$|(\dot{I}_m - \dot{I}_{Cm}) + (\dot{I}_n - \dot{I}_{Cn})| > I \quad (2)$$

$$|(\dot{I}_m - \dot{I}_{Cm}) + (\dot{I}_n - \dot{I}_{Cn})| > k \quad (3)$$

$$|(\dot{I}_m - \dot{I}_{Cm}) - (\dot{I}_n - \dot{I}_{Cn})|$$

式中,  $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$  分别为线路两端 m 侧、n 侧的分相电流相量 (以母线流向线路为正);  $I$  是动作门槛值, 按躲过区外故障时可能产生的最大不平衡差流整定;

$k$  是制动系数, 一般取  $0 < k < 1$ 。式 (2) 为辅助判据, 式 (3) 为主判据, 两式同时成立时, 保护动作为跳闸。

稳态补偿法在稳态时补偿效果很好, 但由于忽略了暂态分量, 不能补偿暂态电容电流。为防止暂态过程中保护误动, 常见的做法是采用定值高低不同的两套辅助判据, 高定值判据可切除过渡电阻较小的严重故障, 低定值判据带有几个周期的延时, 用以提高保护反应过渡电阻的能力<sup>[3]</sup>, 但这种做法是以牺牲保护的速动性为代价的。

### 3 基于时域电容电流补偿的差动判据

电容电流和电压之间存在以下关系。

$$i_t = \frac{du_c}{dt} \quad (4)$$

电容电流时域补偿的原理是在时域下根据输电线等值电路列出满足基尔霍夫电流定律的微分方程, 然后根据式 (4) 对每个采样数据进行逐点微分计算, 实现对暂态和稳态电容电流的有效补偿。时域法  $\pi$  型网络等效电路如图 5 所示。

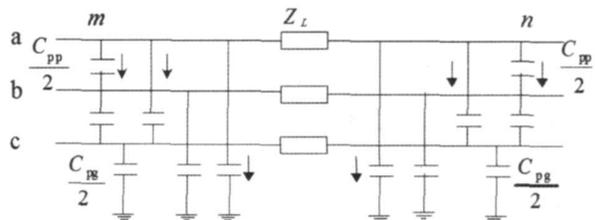


图 5 时域法  $\pi$  型等效电路

根据式 (4), 可求得线路两侧 a 相需补偿的电容电流瞬时值为

$$\begin{cases} i_{tm}^a = \frac{C_{pg}}{2} \frac{du_m^a}{dt} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{du_m^{ab}}{dt} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{du_m^{ac}}{dt} \\ i_{tn}^a = \frac{C_{pg}}{2} \frac{du_n^a}{dt} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{du_n^{ab}}{dt} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{du_n^{ac}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $C_{pg}$  为线路对地电容;  $C_{pp}$  为相间电容, 对于三相对称线路, 它们与线路正序、零序电容的关系为  $C_{pp} = 1/3(C_1 - C_0)$ ,  $C_{pg} = C_0$ 。

方程求解时, 利用数值微分近似求解导数, 即:

$$\frac{du_c(t)}{dt} \approx \frac{u_c(t) - u_c(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{t}_m^a(t) &= \frac{C_{pg}}{2} \frac{u_m^a(t) - u_m^a(t-\Delta t)}{\Delta t} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{2[u_m^a(t) - u_m^a(t-\Delta t)] - \frac{C_{pp}}{2} \frac{u_m^b(t) - u_m^b(t-\Delta t)}{\Delta t} + \frac{u_m^c(t) - u_m^c(t-\Delta t)}{\Delta t}}{\Delta t} \\ \dot{t}_n^a(t) &= \frac{C_{pg}}{2} \frac{u_n^a(t) - u_n^a(t-\Delta t)}{\Delta t} + \frac{C_{pp}}{2} \frac{2[u_n^a(t) - u_n^a(t-\Delta t)] - \frac{C_{pp}}{2} \frac{u_n^b(t) - u_n^b(t-\Delta t)}{\Delta t} + \frac{u_n^c(t) - u_n^c(t-\Delta t)}{\Delta t}}{\Delta t} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

类似可求得 b、c 相需补偿的电容电流瞬时值。线路两侧经时域补偿后的差动电流和制动电流瞬时值为

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{t}_d^{\Phi}(t) &= [\dot{t}_m^{\Phi}(t) - \dot{t}_n^{\Phi}(t)] + [\dot{t}_m^{\Phi}(t) - \dot{t}_n^{\Phi}(t)] \\ \dot{t}_r^{\Phi}(t) &= [\dot{t}_m^{\Phi}(t) - \dot{t}_n^{\Phi}(t)] - [\dot{t}_m^{\Phi}(t) - \dot{t}_n^{\Phi}(t)] \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中,  $\Phi = a, b, c$ 。通过滤波得到差动电流和制动电流的幅值后,采用类似相量差动的判据形式进行判断。

时域法考虑了电容和电压的真实关系,能够对暂态电容有效补偿。但仍基于集中参数  $\pi$  模型,不能对暂态电容电流完全补偿。

#### 4 基于贝瑞隆模型的差动保护判据

对于一条双端 (m 侧、n 侧) 三相线路, m 侧保护装置通过采样得到本侧各时刻三相电压、电流的采样值:  $u_m^a, u_m^b, u_m^c, i_m^a, i_m^b, i_m^c$ ; 通过光纤或微波通道, 得到对侧 (n 侧) 经过采样同步化后各相同时刻的电压电流采样值:  $u_n^a, u_n^b, u_n^c, i_n^a, i_n^b, i_n^c$ 。用 m 侧当前时刻 t 的 3 个电压量和前 (t- $\tau$ ) 时刻 m 侧三相的 6 个电压、电流量和 n 侧三相的 6 个电压、电流, 用贝瑞隆公式<sup>[6]</sup>可以计算得到 m 侧当前时刻 3 个电流量的计算值  $\dot{t}_m^a, \dot{t}_m^b, \dot{t}_m^c$ 。然后用滤波算法对 3 个电流实测值和 3 个计算值进行滤波得到各自的基波矢量  $\dot{t}_m^a, \dot{t}_m^b, \dot{t}_m^c, \dot{t}_n^a, \dot{t}_n^b, \dot{t}_n^c$ 。同理可求得对侧电流的基波矢量  $\dot{t}_n^a, \dot{t}_n^b, \dot{t}_n^c, \dot{t}_m^a, \dot{t}_m^b, \dot{t}_m^c$ 。将实测值和计算值进行比较, 构成基于贝瑞隆模型的差动判据。

$$|\dot{t}_{cdm}^{\Phi}| = |\dot{t}_m^{\Phi} - \dot{t}_n^{\Phi}| > I \quad (8)$$

$$|\dot{t}_{cdn}^{\Phi}| = |\dot{t}_n^{\Phi} - \dot{t}_m^{\Phi}| > I \quad (9)$$

式中,  $\Phi = a, b, c, I$  为定值, 按大于外部故障时可能产生的最大不平衡动作量给定。

因为贝瑞隆模型真实地反映了两端母线之间线路内部无故障的稳态运行或外部故障的暂态过程, 故

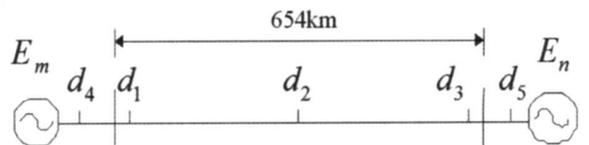
在内部无故障时理论上计算值和实测值应该基本相等, 因此有:  $\dot{t}_m^{\Phi} = \dot{t}_n^{\Phi}, \dot{t}_n^{\Phi} = \dot{t}_m^{\Phi}$ 。故两侧差动保护的动作量  $\dot{t}_{cdm}^{\Phi}, \dot{t}_{cdn}^{\Phi}$  都应该等于 0。但考虑到各种误差和简化考虑损耗的影响, 它们不会绝对为 0。可按最大可能的误差规定一定值, 如果这些动作量都小于此定值, 则表示电压电流关系满足贝瑞隆模型, 输电线路内部没有故障。如果线路内部发生故障, 则贝瑞隆模型被破坏, 必然产生很大的动作量, 从而使保护动作。

使用贝瑞隆差动判据, 必须先对各采样值进行相模变换, Clark 变换和 Karrenbauer 变换的任一单一模量对某些故障类型不能正确反映, 利用对称分量变换矩阵做相模变换能够反映各种故障类型<sup>[7]</sup>, 所以采用对称分量变换矩阵求模分量, 对称分量相模变换与反变换矩阵如下。

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}, S^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, a = e^{j20}$$

#### 5 仿真

用 EMTDC 建立 1 000 kV 双电源单回输电线路仿真模型, 线路模型采用分布参数的贝瑞隆模型, 线路参数来自晋东南-荆门特高压示范工程试验参数<sup>[8]</sup>, 具体参数见图 6。



线路参数:  $r_1 = 0.0758 \Omega / \text{km}, r_0 = 0.1542 \Omega / \text{km}$

$l_1 = 0.83922 \text{ mH} / \text{km}, l_0 = 2.6439 \text{ mH} / \text{km}$

$c_1 = 0.01397 \mu\text{F} / \text{km}, c_0 = 0.009296 \mu\text{F} / \text{km}$

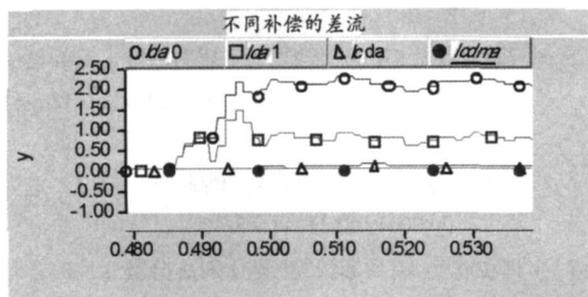
图 6 1 000 kV 系统模型

两端电源角度差为  $26^\circ$ , 负荷电流由 m 端流向 n 端, 每种情况均对稳态补偿差动、时域补偿差动和贝

瑞隆差动判据进行对比。数据采用全周傅立叶算法滤波,每个周期采样 64 点。

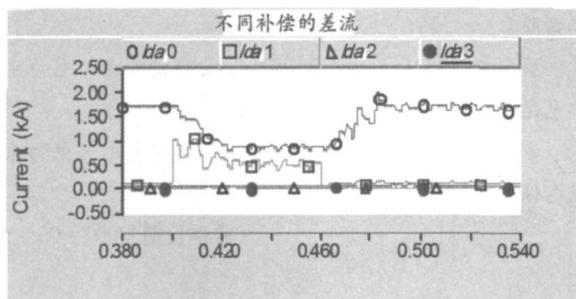
### 5.1 空载合闸、区外故障及切除

图 7 和图 8 分别为空载合闸和区外故障及切除时各判据的差流幅值。可以发现稳态时 3 种补偿法效果均很好,差流都很小。



$I_{da0}$ ——未补偿差流;  $I_{da1}$ ——稳态补偿差流;  
 $I_{da2}$ ——时域补偿差流;  $I_{da3}$ ——贝瑞隆补偿差流

图 7 线路 m 侧空载合闸时 a 相各判据的差流幅值



$I_{da0}$ ——未补偿差流;  $I_{da1}$ ——稳态补偿差流;  
 $I_{da2}$ ——时域补偿差流;  $I_{da3}$ ——贝瑞隆补偿差流

图 8 区外 (d<sub>1</sub> 点) a 相金属性接地故障相差流幅值

在暂态过程中尤其是空载合闸和区外故障时,稳态补偿的效果较差,差流变大,有的时刻甚至接近于未补偿的差流;时域补偿的效果较好,但差流仍比贝瑞隆法的大,这是因为时域补偿仍基于集中参数模型,对暂态量不能完全补偿;贝瑞隆差动判据的差流几乎为零,说明贝瑞隆模型能够精确反应输电线路内部无故障的暂态过程。表 1 是各判据在两种暂态过程中的最大差流幅值。

表 1 空载合闸和区外故障时各判据最大差流幅值

差动判据	空载合闸	区外故障及切除
未补偿	2.296	1.925
稳态补偿	1.478	1.13
时域补偿	0.372	0.196
贝瑞隆法	0.029	0.015

各判据中的门槛电流  $I_b$  都要按躲过空载合闸、

区外故障及切除的最大不平衡差流整定,参照表 1,差流越大的动作门槛就越高,灵敏度也就越低。

稳态补偿高定值辅助判据和时域补偿判据通常取可靠系数  $k=1.5$  躲空载合闸和区外故障的暂态过程;贝瑞隆差动判据取  $k=5$ ,不但能完全躲过区外故障最大不平衡差流,且动作门槛比前两种都低。稳态补偿低定值辅助判据一般取延时  $2\sim 3$  个周波动作切除区内故障,降低了保护的動作速度。

### 5.2 区内故障

区内故障主要讨论各判据的灵敏度和带过渡电阻的能力。未补偿、稳态补偿和时域补偿差动分别按照各判据形式求出制动电流的值,贝瑞隆差动的制动电流按完全能够躲过区外故障的最大差流整定,取 5 倍的可靠系数,  $I_b=0.145$  kA。将各判据差动电流和制动电流的比值设为  $K$  (动作系数)。以出现概率最高的单相接地故障为例,表 2(a)、(b)、(c) 分别给出了区内不同地点且带不同过渡电阻故障时各判据的  $K$  值。

表 2 区内故障时各判据的制动系数  $K$  (a) d<sub>1</sub> 点故障

差动判据	过渡电阻 /Ω		
	100	300	500
未补偿	0.790	0.631	0.607
稳态补偿	0.741	0.449	0.341
时域补偿	0.731	0.408	0.282
贝瑞隆法	31.911	11.435	6.714

(b) d<sub>2</sub> 点故障

差动判据	过渡电阻 /Ω		
	100	300	500
未补偿	1.318	0.753	0.648
稳态补偿	1.322	0.599	0.398
时域补偿	1.335	0.589	0.368
贝瑞隆法	3.633	3.580	2.820

(c) d<sub>3</sub> 点故障

差动判据	过渡电阻 /Ω		
	100	300	500
未补偿	3.455	1.424	0.885
稳态补偿	3.725	1.060	0.525
时域补偿	2.765	1.030	0.493
贝瑞隆法	24.516	5.739	2.728

由表 2 可看出,稳态补偿判据和时域补偿判据在区内故障时带过渡电阻能力反而不如未补偿的,且在送电端带过渡电阻能力很弱;贝瑞隆差动判据区内故障的灵敏度很高,带过渡电阻的能力也很强,而且能解决送电端带过渡电阻能力弱的问题。

## 6 结 论

对稳态补偿差动判据、时域补偿差动判据和贝瑞隆差动判据在 1000 kV 特高压输电线路上的应用进行了研究。结果表明:

稳态补偿判据能有效地补偿稳态电容电流,但对暂态电容电流不能补偿;时域补偿判据对稳态和暂态电容电流都有较好的补偿,由于基于集中参数  $\Pi$  模型,对暂态电容电流不能完全补偿;贝瑞隆差动判据基于分布参数模型,能完全补偿稳态和暂态电容电流。

稳态补偿判据和时域补偿判据在区内故障时带过渡电阻能力不高;贝瑞隆差动判据带过渡电阻能力很强。

时域补偿判据只需传送经补偿后的电流值,对通信要求不高;贝瑞隆差动判据要用相邻的两个采样点数据进行计算,所以对采样频率要求很高,而且需要传送两端的电压电流采样值,对通信的要求也很高,在采样和通信都满足要求的情况下,采用贝瑞隆差动判据是一个很好的选择。

### 参考文献

[1] 陈德树,唐萃,尹项根,等.特高压交流输电继电保护及  
(2); 503—511.

[10] Canuso E, Diconato M, Minoia A, et al. Supplier risk analysis in the day-ahead electricity market [J]. IEEE Trans on Power Systems 2006, 153(3); 335—341.

[11] 谢俊,陈星莺.构造供电公司最优电能分配策略的 CVaR 方法 [J]. 现代电力, 2007, 24(2); 44—48.

[12] 刘嘉佳,刘俊勇.计及动态一致性风险度量的水电短期优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10); 94—99.

[13] 张富强,周浩.电力市场金融风险分析——分析法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(3); 23—28.

[14] 林辉,何建敏. VaR 在投资组合应用中存在的缺陷与 CVaR 模型 [J]. 财贸经济, 2003, 12; 46—69.

[15] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of conditional value at risk [J]. Journal of Risk 2000, 2(3); 21—41.

[16] 孟志青,虞晓芬,蒋敏,等.基于动态 CVaR 模型的房地产组合投资的风险度量与控制策略 [J]. 系统工程理

相关问题 [J]. 继电器, 2007, 35(5); 1—3.

[2] 李瑞生,索南加乐. 750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响 [J]. 继电器, 2006, 34(3); 1—4.

[3] 伍叶凯,邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案 [J]. 继电器, 1997, 25(4); 4—8.

[4] 索南加乐,张恽宁,齐军,等.  $\Pi$  模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5); 12—18.

[5] 吴通华,郑玉平,朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12); 61—67.

[6] 郭征,贺家李. 输电线纵联差动保护新原理 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11); 1—5.

[7] 和敬涵,范瑜,薄志谦等. 基于对称分量变换的暂态电流极性方向比较保护算法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(2); 116—120.

[8] Z Y, Xu Z Q, Du L, Ran eto. A Current Differential Relay for a 1000-kV UHV Transmission Line [J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2007, 22(3).

### 作者简介:

桑丙玉 (1983—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

喻 奇 (1984—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2009—06—10)

(上接第 9 页)

(2); 503—511.

[10] Canuso E, Diconato M, Minoia A, et al. Supplier risk analysis in the day-ahead electricity market [J]. IEEE Trans on Power Systems 2006, 153(3); 335—341.

[11] 谢俊,陈星莺.构造供电公司最优电能分配策略的 CVaR 方法 [J]. 现代电力, 2007, 24(2); 44—48.

[12] 刘嘉佳,刘俊勇.计及动态一致性风险度量的水电短期优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10); 94—99.

[13] 张富强,周浩.电力市场金融风险分析——分析法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(3); 23—28.

[14] 林辉,何建敏. VaR 在投资组合应用中存在的缺陷与 CVaR 模型 [J]. 财贸经济, 2003, 12; 46—69.

[15] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of conditional value at risk [J]. Journal of Risk 2000, 2(3); 21—41.

[16] 孟志青,虞晓芬,蒋敏,等.基于动态 CVaR 模型的房地产组合投资的风险度量与控制策略 [J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(9); 69—76.

[17] 陈金龙,张维. CVaR 与投资组合优化统一模型 [J]. 系统工程理论方法应用, 2002, 11(1); 68—71.

[18] 蒋敏,胡奇英,孟志青.基于权值的多阶段风险值证券组合问题研究 [J]. 管理工程学报, 2006, 20(3); 38—40.

[19] 张兴平,陈玲,武润莲.加权 CVaR 下的发电商多时段投标组合模型 [D]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16); 79—83.

[20] 王壬,尚金成,冯畅,等.基于 CVaR 风险计量指标的发电商投资组合策略及模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14); 5—9.

### 作者简介:

吴 薇 (1986—),女,硕士研究生,研究方向为电力市场。

刘俊勇 (1963—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力市场、灵活交流输电及电力系统可视化等。

(收稿日期: 2009—06—10)