

## 适应于酒泉风电送出的 750 kV 线路纵联保护原理研究

何世恩<sup>1,2</sup>, 索南加乐<sup>1</sup>, 杨 铨<sup>1</sup>, 谈树峰<sup>1</sup>, 焦在滨<sup>1</sup>, 夏经德<sup>1</sup>, 王 莉<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对酒泉大规模风电基地送出 750 kV 输电线路, 提出了一种适用于带串补和可控电抗器输电线路的故障分量综合阻抗纵联保护新原理。通过计算线路故障分量差动电压与差动电流的比值得到综合阻抗, 外部故障时, 综合阻抗反映线路的并联容抗, 模值很大; 内部故障时, 综合阻抗反映系统阻抗, 模值很小, 并分析指出补偿相间电容后再分相计算综合阻抗判据, 可以增强健全相保护的可靠性。新原理容易整定, 本身具有选相能力, 不受负荷波动、电容电流的影响, 不受串补电容以及可控电抗器的影响, 耐受过渡电阻能力强。利用 ATP 以酒泉风电基地 750 kV 送出系统为原型进行仿真实验, 结果表明该原理可靠灵敏, 适应于大规模风电送出工程的需要。

**关键词:** 输电线路; 纵联保护; 故障分量综合阻抗; 串补; 可控电抗器

### A 750 kV transmission line pilot protection suitable to Jiuquan wind power base delivery

HE Shi-en<sup>1,2</sup>, SUONAN Jia-le<sup>1</sup>, YANG Cheng<sup>1</sup>, TAN Shu-feng<sup>1</sup>, JIAO Zai-bin<sup>1</sup>, XIA Jing-de<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>

(1. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** This paper presents a new pilot protection scheme based on fault component integrated impedance (FCII) for 750 kV transmission line with SC and TCR for Jiuquan wind power base. The FCII is the ratio of the sum of the fault component voltage phasor and the sum of the fault component current phasor of two terminals. It is used to identify if there is a fault on the line. If the fault is out of the line, the calculation value of FCII reflects the line capacitive impedance which has greater amplitude, and if the fault is on the line, it reflects the system impedance and line impedance which has relatively smaller amplitude. According to the amplitude of the FCII, the internal fault can be distinguished from external fault. Through compensating the capacity between phases the reliability of the new scheme can be enhanced. The scheme can be set easily and has phase selection capacity, it is free from the influence of line load fluctuation, capacitive current, SC and TCR, and it can resist higher fault resistance. The effectiveness of the new scheme is verified by Jiuquan wind power 750 kV transmission system model and the new scheme is suitable to the large scale intermittent wind power delivery.

**Key words:** transmission line; pilot protection; FCII; SC; TCR

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0087-05

## 0 引言

按照甘肃省委省政府建设河西风电走廊、再造西部“陆上三峡”的战略构想, 甘肃酒泉风电作为我国第一个千万千瓦级风电基地已经正式开工。为了满足风电送出, 配套建设的安西~酒泉~金昌~永登双回 750 kV 输电线路, 以常规输电技术只能输送 180 万 kW 左右, 无法满足 2010 年底计划建成投产的 516 万 kW 风电送出的需要。为此必须要采用灵活交流输电 (Flexible AC Transmission System, FACTS) 技术, 经过研究确定, 安西—酒泉—金昌

—永登双回 750 kV 输电线路将采用固定串补和可控电抗器<sup>[1-2]</sup>。

可控电抗器 (Thyristor Controlled Reactor, TCR) 和串补 (Series Capacitor, SC) 是常用的 FACTS 之一, 具有提高系统暂态稳定性和输送能力等功能<sup>[3-5]</sup>。风力发电是将风能转变为机械能再转变为电能实现发电, 必然具有风的间歇性的特点。安西—酒泉—金昌—永登输变电系统送端电源主要为风电, 有功功率具有波动性。风电功率波动使输电系统无功补偿设备随之频繁投切, 影响设备使用寿命, 需要可控电抗器。线路潮流的随机波动和可控电抗

器的动作，将给系统继电保护带来影响。

文献[6]指出现有的继电保护原理应用于 FACTS 并不完善，在带有串补线路区内故障有可能保护拒动，而反向故障可能误动，正向区外故障可能超越<sup>[7]</sup>；由于风电的间歇性、波动性，线路电压波动比较大<sup>[1-2]</sup>，由于带串补和并联可控电抗器，光纤纵差保护不能精确补偿电容电流，而波动的潮流和可控电抗器的调节动作不但使继电保护频繁启动，还影响一些保护判据的门槛，甚至使保护灵敏度降低，而且高压继电保护反事故措施要求采用不同原理的双重化，因此分析探讨新的原理是需要的。

本文将故障分量综合阻抗的纵联保护原理推广到了带串补和可控电抗器的风电送出线路，分析了可控串补、电抗器的影响，并提出补偿相间电容电流后再计算综合阻抗以提高健全相保护的可靠性。基于酒泉风电 750 kV 送出工程数据，利用 ATP 建立仿真模型验证了新原理的有效性。

## 1 基于故障分量综合阻抗的纵联保护原理

### 1.1 故障分量综合阻抗的概念

文献[9-10]定义了故障分量线路综合阻抗如下：

$$Z_{cd} = \frac{\Delta \dot{U}_{cd}}{\Delta \dot{I}_{cd}} \quad (1)$$

式中： $\Delta \dot{U}_{cd} = \Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n$  为故障分量差动电压；

$\Delta \dot{I}_{cd} = \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n$  为故障分量差动电流。

### 1.2 串补线路区外故障时故障分量综合阻抗分析

现场为了便于维护，串补电容常安装在线路两端变电站内，本文以串补电容位于 m 端母线出口进行分析。外部故障时的等效电路如图 1 所示。

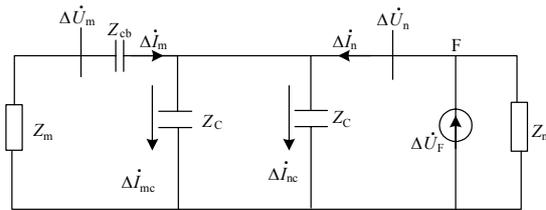


图 1 外部故障的短路附加状态

Fig.1 Figure of external fault-added status

故障分量差动电流为：

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{cd} &= \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n = \Delta \dot{I}_{mc} + \Delta \dot{I}_{nc} = \\ &= (\Delta \dot{U}_m - Z_{cb} \Delta \dot{I}_m) / Z_c + \Delta \dot{U}_n / Z_c = \\ &= (\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_{cb}) / Z_c + \Delta \dot{U}_n / Z_c \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\Delta \dot{U}_{cb}$  为  $\dot{I}_m$  在串补电容上形成的压降。若 PT 装设在母线处，由于采用可控串补技术，其补偿度

未知，则无法计算出  $\Delta \dot{U}_{cb}$ 。假设串补电容最大补偿度为 50%，则  $Z_{cb\max} = -0.5Z_l$ ，因此  $\Delta \dot{U}_{cb\max} = Z_{cb\max} \times \dot{I}_m = -0.5Z_l \times \dot{I}_m$ ，此时的综合阻抗：

$$Z'_{cd} = (\Delta \dot{U}'_m + \Delta \dot{U}_n) / \Delta \dot{I}_{cd} = Z_c \quad (3)$$

其中  $\Delta \dot{U}'_m = \Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_{cb}$ ，因此

$$Z_{cd} = (\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n) / \Delta \dot{I}_{cd} < Z_c \quad (4)$$

此时的故障分量综合阻抗比线路并联容抗值要小一些。由于线路本身的压降较小，因此相当于线路压降一半的  $\Delta \dot{U}_{cb}$  也比较小，其对故障分量综合阻抗造成的影响不是很大，相对于系统阻抗和线路阻抗来说，其模值较大。

### 1.3 串补线路区内故障时故障分量综合阻抗分析

区内故障时，故障分量差动电流中的电容分量是很小的，忽略了分布电容影响后，内部故障的短路附加状态网络如图 2 所示。

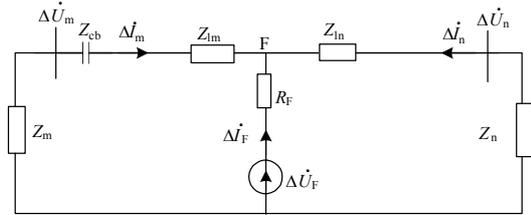


图 2 内部故障的短路附加状态

Fig.2 Figure of internal fault-added status

假设故障点的位置与 m 端的距离占线路全长的百分比为  $p$ ，若串补电容的补偿度为 50%，则  $Z_{cb} = -0.5Z_l$ ，因此故障点两侧的阻抗  $Z_1$  和  $Z_2$  分别为  $Z_1 = Z_m + Z_{lm} + Z_{cb} = Z_m + (p - 0.5)Z_l$ ， $Z_2 = Z_n + Z_{ln} = Z_n + (1 - p)Z_l$ ，由前面的分析可知：

$$Z_{cd} = -\frac{Z_2 \times Z_m + Z_1 \times Z_n}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

可见，当故障点的位置发生变化，即  $p$  取不同值时， $Z_1$ 、 $Z_2$  也随之变化，但一定有  $Z_{cd} < \min\{2Z_1, 2Z_2\}$ ， $Z_{cd}$  仍反映系统阻抗和线路阻抗，数值较小。

### 1.4 基于故障分量综合阻抗的纵联保护判据

基于上述分析，给出故障分量综合阻抗的纵联保护判据：

$$\begin{cases} |Z_{cd}| < Z_{set} \\ |\Delta \dot{I}_{cd}| > I_{set} \end{cases} \quad (6)$$

$Z_{\text{set}}$  为阻抗定值, 整定原则为:

$$Z_{\text{set}} = K_{\text{rel}} \times Z_c \quad (7)$$

其中,  $K_{\text{rel}}$  为可靠系数, 一般可以取 0.5~0.6, 足以保证区外故障时不误动。

以电压等级为 750 kV、长度为 372 km 的线路为例,  $|Z_c|$  约在 1 250  $\Omega$  左右, 可以将  $Z_{\text{set}}$  整定为 500  $\Omega$  左右。线路长度短时,  $|Z_c|$  变大, 根据式 (7) 整定的  $Z_{\text{set}}$  也会较大, 此时可以将  $Z_{\text{set}}$  取为 500  $\Omega$ 。

$\Delta \dot{I}_{\text{cd}}$  是故障分量, 在系统正常运行时,  $|\Delta \dot{I}_{\text{cd}}|$  理论上为零,  $I_{\text{set}}$  为电流定值, 一般  $I_{\text{set}}$  可取大于 10 A (一次值), 已有足够的安全性。

## 1.5 性能分析

### 1.5.1 并联电抗器投切的影响

若串补线路两端装有并联电抗器, 电抗器的阻抗要比系统电源阻抗和线路阻抗大得多, 区内故障时, 流过并联电抗器的故障分量差动电流很小, 因此可以忽略电抗器的影响。区外故障时, 输电线路一般采用欠补偿, 即当并联电抗器投入运行后, 线路上的差动电流依然是电容电流, 相对于其未投入时的情况, 故障分量综合阻抗的模值增大。

对于装有并联电抗器的线路, 如果定值  $Z_{\text{set}}$  按照电抗器退出运行时的情况来整定, 则当电抗器退出运行时, 该原理可以正确工作。当电抗器投入运行时, 区内故障的灵敏度不会受影响, 而外部故障时的安全性更高。可见该原理可以顺利应用于带可控补偿电抗器的输电线路。

### 1.5.2 相间电容影响故障分量综合阻抗的分析

图3示出了考虑相间电容影响的健全相B相(故障相为A相)的故障分量等效电路图(C相做了适当简化), 用  $\Delta \dot{E}_M$  来表示电磁耦合等效电动势。

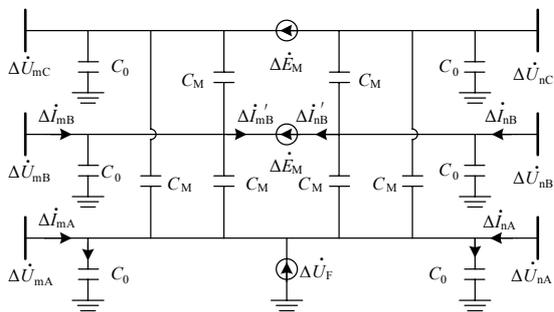


图3 内部单相故障时相间电容影响等效电路图

Fig.3 Internal single line-ground fault equivalent diagram of phase capacitor influence

图3中,  $\Delta \dot{U}_{m_A}$ 、 $\Delta \dot{U}_{n_A}$ 、 $\Delta \dot{I}_{m_A}$  和  $\Delta \dot{I}_{n_A}$  分别为线路 A 相两端的故障分量电压和电流;  $\Delta \dot{U}_{m_B}$ 、

$\Delta \dot{U}_{n_B}$ 、 $\Delta \dot{I}_{m_B}$  和  $\Delta \dot{I}_{n_B}$  分别为线路 B 相两端的故障分量电压和电流;  $\Delta \dot{I}'_{m_B}$  和  $\Delta \dot{I}'_{n_B}$  为线路等效电容和相间电容分流后的电流。从图中可以看出, 两者方向相反, 幅值相等。

$$\Delta \dot{I}'_{m_B} = \Delta \dot{I}_{m_B} - \Delta \dot{U}_{m_B} / Z_{C0} - (\Delta \dot{U}_{m_B} - \Delta \dot{U}_{m_A}) / Z_{CM}$$

则可得考虑相间电容影响的补偿公式:

$$\Delta \dot{I}'_{n_B} = \Delta \dot{I}_{n_B} - \Delta \dot{U}_{n_B} / Z_{C0} - (\Delta \dot{U}_{n_B} - \Delta \dot{U}_{n_A}) / Z_{CM}$$

$$Z_{\text{cdB}} = (\Delta \dot{U}_{m_B} + \Delta \dot{U}_{n_B}) / (\Delta \dot{I}'_{m_B} + \Delta \dot{I}'_{n_B}) = \frac{\Delta \dot{U}_{m_B} + \Delta \dot{U}_{n_B} + \frac{C_m (\Delta \dot{U}_{m_B} + \Delta \dot{U}_{n_B} - \Delta \dot{U}_{m_A} - \Delta \dot{U}_{n_A})}{C_0}}{\Delta \dot{I}'_{\text{cdB}}} =$$

$$[\Delta \dot{U}_{\text{cdB}} + C_m (\Delta \dot{U}_B - \Delta \dot{U}_A) / C_0] / \Delta \dot{I}'_{\text{cdB}} \quad (8)$$

同理可得:

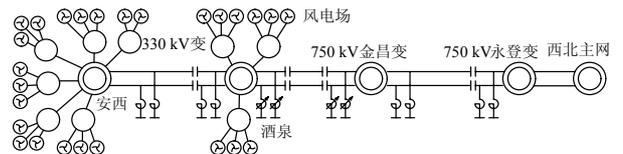
$$Z_{\text{cdC}} = [\Delta \dot{U}_C + C_m (\Delta \dot{U}_C - \Delta \dot{U}_A) / C_0] / \Delta \dot{I}'_{\text{cdC}} \quad (9)$$

以上是内部单相故障时, 考虑相间电容影响的非故障相故障分量综合阻抗。相别不同时将公式中的相应相别加以替换即可。对于相间故障, 因为不影响健全相, 可以不考虑。对于两相接地故障, 类似地, 以 AB 两相接地为例可以推出健全相故障分量综合阻抗表达式。所以实际分相计算综合阻抗时, 应按式 (8)、(9) 补偿相间电容影响。

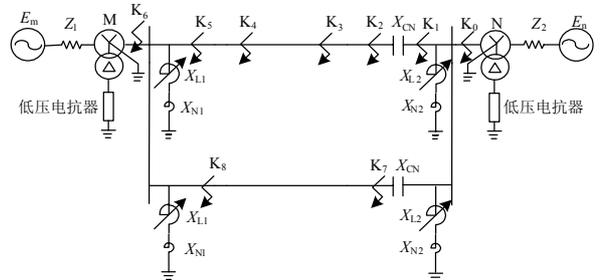
## 2 仿真实验

### 2.1 仿真模型

为了验证上述基于故障分量综合阻抗的差动保护新原理, 以酒泉风电送出系统方案为原型, 利用 ATP 建立了仿真系统, 如图 4 所示。



(a) 酒泉风电送出系统方案



(b) 仿真模型

图4 带串补及可控电抗器的输电线路仿真系统

Fig.4 Simulation model of transmission line model with SC and TCR

### 2.2 仿真结果

仿真实验在  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $K_5$ 、 $K_6$ 、 $K_7$ 、 $K_8$  九个点分别模拟不同风电出力、各种金属性故障和带过渡电阻接地故障。计算时采用傅里叶滤波算法，采样率为 2 kHz。当  $|\Delta \dot{I}_{cd}|$  小于 10 A（一次值）， $|\Delta \dot{U}_{cd}|$  小于 750 V（一次值）时，计算综合阻抗已经没有意义，因此不再给出结果。

由图 5、6 可以看出，补偿相间电容影响后，健全相的故障分量综合阻抗明显增大，而没有补偿相间电容的综合阻抗则较小。可见，相间电容对故障分量综合阻抗有影响，相间电容大，则故障分量综合阻抗相对小，保护安全性降低。所以对于紧凑型及长线路，需要补偿相间电容的影响。

图 7~10 的仿真表明，基于综合阻抗的输电线路纵联保护新原理，区内故障时，不受风电出力变化影响，且可以耐受 750  $\Omega$  以上的过渡电阻，保护灵敏度很高，适用于大规模风电输出的带串补及可控电抗器 750 kV 长线路的主保护。

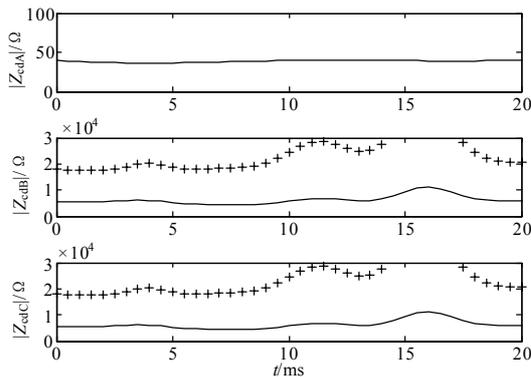


图 5 区内  $K_1$  点 A 相金属性接地故障时的三相综合阻抗（“+”为相间电容补偿后）  
Fig.5 FCII with phase A ground at  $K_1$  (“+”is with phase capacity compensation)

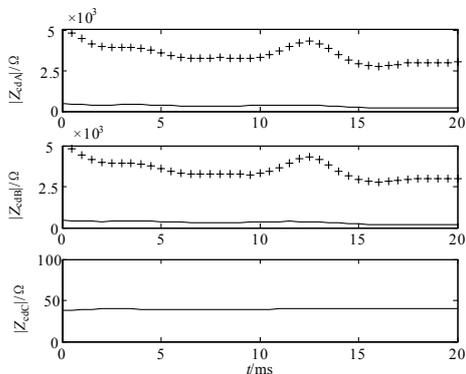


图 6 区内  $K_3$  点 C 相金属性接地故障时的三相综合阻抗（“+”为相间电容补偿后）  
Fig.6 FCII with phase C ground at  $K_3$  (“+”is with phase capacity compensation)

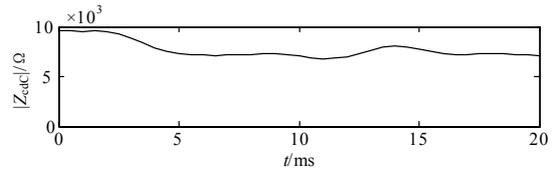


图 7 区外  $K_7$  点三相短路故障时的综合阻抗（三相相同）  
Fig.7 FCII with external phase A ground at  $K_7$  (three phase FCII is identical)

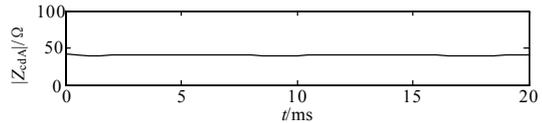


图 8 区内  $K_4$  点 A 相 750  $\Omega$  接地故障时的 A 相综合阻抗  
Fig.8 Phase A FCII with internal phase A ground at  $K_4$

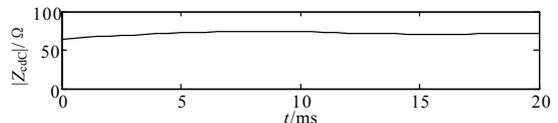


图 9 区内  $K_2$  点 C 相接地故障时的 C 相综合阻抗（风电全停）  
Fig.9 Phase C FCII with internal phase C ground at  $K_2$  (wind power is zero)

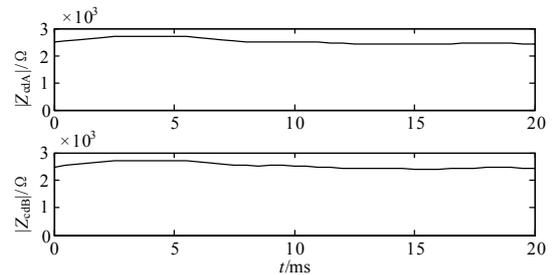


图 10 区外  $K_6$  点 AB 相间短路故障时的 A、B 相综合阻抗  
Fig.10 Phase A, B FCII with external phase AB short-circuit at  $K_6$

### 3 结论

本文将基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护原理，推广应用到带串补和可控电抗器的大规模风电送出长线路，并提出补偿相间电容的影响后再计算健全相的综合阻抗，大大提高了保护的可靠性。利用 ATP 以酒泉风电送出的 750 kV 输电系统为原型，建立了仿真模型进行实验验证。理论分析和仿真结果表明，在发生区外故障时，新原理的动作量反映线路容抗，其数量级为千欧；在内部故障时，动作量反映系统阻抗和线路阻抗，其数值不大于 200  $\Omega$ ，二者有明显区别。分析表明发生非对称故障时，健全相的故障分量综合阻抗具有外部故障特征。该原理耐受过渡电阻能力强，不受负荷电流、电容

电流、可控串补补偿度调整、可控电抗器补偿度调整的影响, 具有较高的灵敏性, 仿真验证了新原理的有效性, 表明该原理可以用于带串补电容和并联电抗器的输电线路的保护, 作为此类高压线路双重化保护的选择之一。

### 参考文献

- [1] 中国电力科学研究院. 安西-酒泉-永登750kV双回线路串补工程可行性研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.  
CEPRI. The Anxi—Jiuquan—Jinchang—Yongdeng double-circuit 750 kV transmission line SC project feasibility study[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2009.
- [2] 中国电力科学研究院. 酒泉风电基地送出FACTS应用研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.  
CEPRI. The Jiuquan wind power base transmission FACTS application study[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2009.
- [3] 王维洲, 彭夕岚, 何世恩. 成碧220 kV可控串补装置的运行与维护[J]. 电网技术, 2007, 31 (1): 50-55.  
WANG Wei-zhou, PENG Xi-lan, HE Shi-en. The operation and maintenance of Chen-Bi 220 kV TCSC[J]. Power System Technology, 2007, 31 (1): 50-55.
- [4] 中国电力科学研究院. 可控串补的工程应用研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2000.  
CEPRI. The engineering application study of the TCSC[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2000.
- [5] 中国电力科学研究院. 可控串补的电力系统分析[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2000.  
CEPRI. The power system analysis of the TCSC[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2000.
- [6] 西北电网公司. 适用于带有可控串补及可控电抗器的750 kV输电线路保护和电抗器保护解决方案研究报告[R]. 西安: 西北电网公司, 2007.  
Northwest Grid. The study of 750 kV transmission line and reactor protection suitable to TCSC and TCR[R]. Xi'an: North-west China Power Grid Company, 2007.
- [7] 郑玉平. 串补线路继电保护的研究与同杆双回线继电保护及重合闸的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.  
ZHENG Yu-ping. Study on protection for transmission line with SC and recloser of double-circuit lines in same tower[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [8] 索南加乐, 刘凯, 粟小华, 等. 输电线路综合阻抗纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3): 36-40.  
SUONAN Jia-le, LIU Kai, SU Xiao-hua, et al. New principle of differential protection based on the fault component integrated impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 36-40.
- [9] 索南加乐, 刘凯, 张悻宁, 等. 基于电阻性差流的差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (16): 45-49.  
SUONAN Jia-le, LIU Kai, ZHANG Yi-ning, et al. New principle of differential protection based on the resistance component of differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (16): 45-49.
- [10] 索南加乐, 何世恩, 粟小华, 等. 带可控串补和可控电抗器输电线路纵联保护新原理[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (10): 59-63.  
SUONAN Jia-le, HE Shi-en, SU Xiao-hua, et al. New principle of comprehensive fault component impedance protection of transmission line with TCSC and TCR[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (10): 59-63.

收稿日期: 2009-12-27; 修回日期: 2010-03-09

#### 作者简介:

何世恩 (1961-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事电力系统运行管理、继电保护新技术的开发和风电并网工作;

E-mail: he.shien@stu.xjtu.edu.cn; hofstadter2003@sina.com

索南加乐 (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护稳定控制;

杨钺 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(上接第 86 页 continued from page 86)

State Electric Power Dispatching and Communication Center. power system relay protection rules collection[M]. Second edition. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

收稿日期: 2009-09-03; 修回日期: 2009-10-21

#### 作者简介:

刘 华 (1955-), 男, 学士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护管理工作; E-mail: jdbhzzhn@sina.com

田 芳 (1972-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护整定计算和管理的工作;

张予鄂 (1963-), 女, 高级工程师, 长期从事电力系统继电保护研究及计算工作。