

# 超高压可控电抗器抑制潜供电流研究

姚尧, 阮羚, 沈煜

(湖北省电力试验研究院, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 笔者阐述了抑制潜供电流的意义和国内外的研究现状。针对潜供电流产生的机理及抑制措施进行了详细分析, 介绍了可控电抗器的结构和基本工作原理, 列出了四射线补偿方法下并联电抗器中性点小电抗器的计算公式, 并建立了三峡右岸-江陵 500 kV 输电线路和可控电抗器模型, 仿真研究了用可控电抗器取代常规并联电抗器后抑制潜供电流的效果。仿真结果表明, 超高压可控电抗器能有效地抑制潜供电流。

**关键词:** 可控电抗器; 超高压输电线路; 潜供电流; 单相自动重合闸; 中性点小电抗

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0022-05

## EHV Controllable Reactor for Suppressing Secondary Arc Current

YAO Yao, RUAN Ling, SHEN Yu

(Hubei Electric Power Testing & Research Institute, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** The current research of suppressing secondary arc current in the world is introduced. The mechanism of secondary arc current and the suppression methods are analyzed. The structure and fundamental principle of extra-high voltage controllable reactor are also analyzed. According to the four-radial compensation method of shunt reactors, the formulae for selecting neutral grounding reactor are listed. Based on the electromagnetic transient program (EMTP), simulation models of EHV controllable reactor and 500 kV transmission line from Sanyou to Jiangling are built up. And numerical simulations are performed to verify the effectiveness of suppressing secondary arc current. The results demonstrate that the controllable reactor can suppress secondary arc current effectively in EHV transmission line.

**Key words:** controllable reactor; extra-high voltage(EHV) transmission line; secondary arc current; single-phase auto-reclosing; neutral grounding reactor

### 0 引言

在超高压线路运行中, 时常会发生因雷击闪络等原因造成的单相接地故障, 它在所有故障中大约占 70%~90%, 而其中又有 70%~80%是暂时的。我国 500 kV 超高压输电线路普遍采用单相自动重合闸来消除暂时单相接地故障, 以提高系统的稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。超高压输电线路一般比较长, 潜供电流较大, 使故障处的电弧不易熄灭, 单相重合闸的时间就会延长甚至重合闸失败<sup>[2]</sup>。研究计算潜供电流的大小及其抑制措施以改善电弧自灭特性是保证单相自动重合闸成功的关键<sup>[3]</sup>。运行经验和试验结果表明: 将潜供电流限制在 20 A 以内, 允许的单相重合闸时间将小于 1 s。

国内外对潜供电流的抑制方法不外乎两种: 采用快速接地开关(HSGS)或者并联电抗器加中性点小电抗<sup>[4]</sup>。日本已经成功将快速接地开关应用于特

高压线路中, 效果比较理想。而我国的超高压线路中普遍安装并联电抗器来限制因电容效应引起的过电压, 这使得采用中性点小电抗方式来抑制潜供电流成为可能。

由于并联电抗器容量不可调节, 当线路的传输功率接近于自然功率时, 它的存在将会使线路电压过分降低, 还会使传输功率受到极大影响<sup>[5]</sup>。因此, 用可控电抗器来代替固定电抗器是当前超高压远距离输电发展的需要和必然趋势<sup>[6,7]</sup>, 它能随着线路的传送功率自动、平滑地调节自身的容量<sup>[8]</sup>。配合合适的中性点小电抗能将潜供电流限制在一定的范围内, 成功实现单相自动重合闸<sup>[9]</sup>。我国研制的 500 kV 可控电抗器已在三峡右岸-江陵超高压输变电工程中投入试运行, 笔者仿真研究了该可控电抗器代替常规并联电抗器后对潜供电流的抑制效果。

### 1 潜供电流产生机理及抑制措施

由于线路存在相间电容和相间互感, 当故障相

收稿日期: 2009-02-22; 修回日期: 2009-03-11

作者简介: 姚尧(1979-), 男, 博士, 从事高电压技术和电力系统过电压研究。

被切除后,健全相通过静电感应和电磁耦合向故障相供电,在接地电弧通道中仍将流过潜供电流<sup>[10]</sup>。故障电弧熄灭后,被断开的故障相上的电压为恢复电压。潜供电弧的熄灭时间主要取决于潜供电流的大小和弧道两端的恢复电压。

潜供电流有两个分量<sup>[11]</sup>:一个是健全相通过相间电容的静电感应向故障相供电,称为静电感应分量,它与线路电容参数即与结构(相间距、分裂情况及排列换位等)和长度有关,线路愈长电压愈高,潜供电流也愈大;另一个是健全相的负荷电流通过相间互感的电磁耦合向故障相供电,称为电磁感应分量,它与故障点位置有关,越靠近两侧电磁感应分量越大,因此,潜供电流最大值出现在线路的两端。在超高压长线路中,潜供电流主要部分为静电感应分量。因此,如果潜供电流的静电感应分量得到补偿,潜供电流将会降到允许水平以下。

采用带中性点电抗的并联电抗器时,并联电抗器用来补偿线路正序电容,改善沿线的电压分布,限制线路轻载或正常运行状态下甩负荷引起的过电压<sup>[12]</sup>。然而,在对长线路进行不对称切合时,健全相对断开相的相间电容与断开相的对地电抗之间容易形成串联谐振回路,如不采取措施将会在断开相上产生极高的线性谐振过电压,影响单相重合闸的成功重合。因此,一般应尽量避免全补偿,并且通过在电抗器中性点加入小电抗以产生一个等值的相间感抗,其等效电路见图1。图1中 $U_A$ 为电源等值电势, $X_{C12}$ 为断开相对健全相间的容抗, $X_{L0}$ 为并联电抗器对地感抗, $X_{C0}$ 为断开相对地容抗, $U_h$ 为断开相上的感应电压。

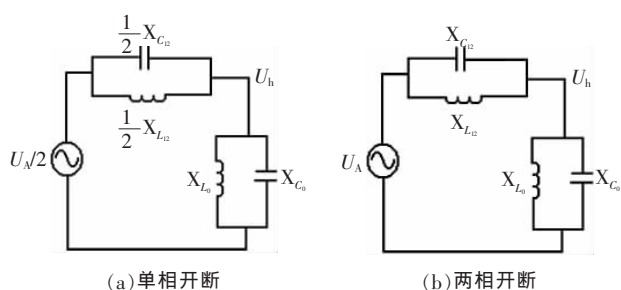


图1 非全相运行时断开相上工频电压等值计算电路

这种二次补偿方式可以补偿相间电容,增大相间阻抗。选择合适的小电抗可使相间发生并联谐振,相间阻抗为无穷大,补偿了潜供电流的静电分量,隔断了相间的静电感应。它不仅破坏了工频谐振,而且使断开相上的传递过电压为零,补偿了相间电容,减小了潜供电流。可控电抗器即是采用这种二次补偿的方式来抑制潜供电流。

## 2 可控电抗器的结构和工作原理

可控电抗器的简化结构<sup>[13]</sup>见图2。

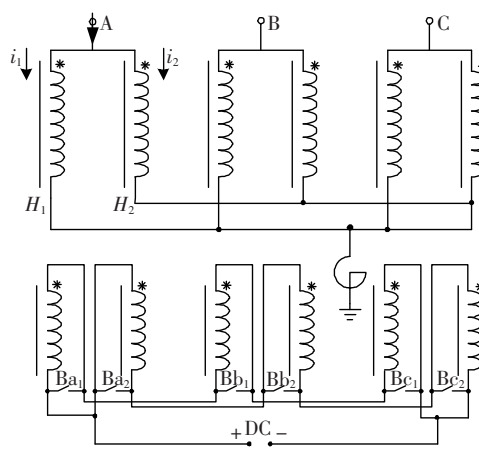


图2 可控电抗器结构简化接线图

可控电抗器工作绕组每相均由两个并联绕组组成,三相星型连接。工作绕组同名端并联接到500 kV系统侧,中性点经小电抗接地。控制绕组三角形连接,为零序谐波电流提供一个闭合回路。控制绕组的异名端并联接入整流器的输出侧。

可控电抗器的容量取决于铁心的饱和程度。改变整流器输出的直流控制电流,对铁心分别起到增磁和去磁的作用,进而调节铁心磁饱和度,即可达到平滑调节电抗器容量的目的<sup>[14,15]</sup>。调节整流装置的输出使可控电抗器工作在极限饱和状态<sup>[16]</sup>,此时,铁心饱和度与输出电流的关系见图3。

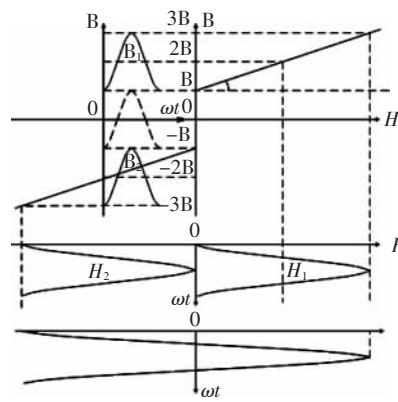


图3 铁心饱和原理图

由图3可见,直流激磁电流使铁心的磁通抬升,在一个工频周期内两个铁心都始终处于饱和状态。铁心的磁场强度 $H_1$ 、 $H_2$ 波形分别如图3中所示。设铁心长度为 $l$ ,工作绕组匝数为 $N$ ,则可控电抗器的交流输出电流 $i$ 为

$$i = \frac{l}{2N} (H_1 + H_2) \quad (1)$$

超高压线路中可控电抗器应具有快速响应能力。在断路器计划操作或者故障跳闸时,用旁路断路器(图1中的 $B_{a1}$ 和 $B_{a2}$ 、 $B_{b1}$ 和 $B_{b2}$ 、 $B_{c1}$ 和 $B_{c2}$ )将控制绕组短路,这样能迅速将可控电抗器调节到大容量,起到抑制过电压和补偿潜供电流的作用<sup>[17]</sup>。可控电抗器在额定容量下将控制绕组短路后电流的

过渡过程见图 4。

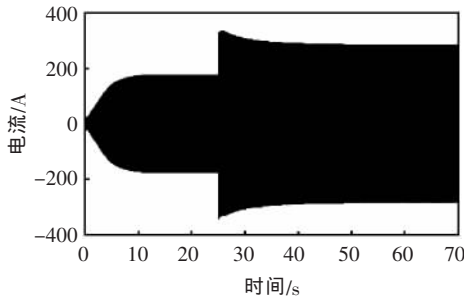


图 4 可控电抗器 25 s 时将控制绕组短接后过渡过程波形

由图 4 可见，短接控制绕组后能迅速调节到比额定更高的输出容量。

### 3 中性点小电抗值的计算

假设可控电抗器的正序和零序感抗分别为  $X_{L1}$  和  $X_{L0}$ ，每公里导线的正序电容和零序电容分别为  $C_1'$  和  $C_0'$ ，导线的补偿度  $T_k = X_{C1}/X_{L1}$ ,  $T_0 = 1 - C_0'/C_1' = 3C_{12}'/C_1'$ ，其中  $C_{12}'$  为每公里导线的相间电容，则小电抗  $X_N$  的理论值<sup>[18]</sup>应为

$$\frac{X_N}{X_{L1}} = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{1 - \frac{T_0}{T_k}} - \frac{X_{L0}}{X_{L1}} \right) = \frac{(G' - 1) \frac{T_0}{T_k} + 1}{3G' \left( \frac{T_0}{T_k} - 1 \right)} \quad (2)$$

式(2)中,  $G' = X_{L1}/X_{L0}$  为电抗器的正序零序电抗值之比。

### 4 潜供电流及其抑制仿真研究

#### 4.1 EMTP 仿真建模

三右-江陵 500 kV 输电线路模型见图 5。双回线全长分别为 127.1 km 和 127.3 km。按丰大运行方式进行仿真计算，线路输送潮流为  $2 \times 836$  MW，功率因数为  $\cos\phi = 0.968$ 。其中 I 回三右侧装设一组固定高抗，容量为 150 Mvar，中性点小电抗值取值  $(450 \pm 45) \Omega$ 。II 回江陵变电站线路侧装设一组可控电抗器，额定容量为 120 Mvar，最高运行相电压  $550/\sqrt{3}$  kV，额定容量时补偿度为 73%。

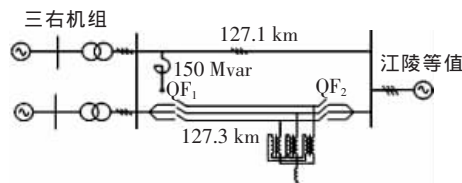


图 5 三右-江陵 500 kV 研究线路接线图

根据实际线路和杆塔参数及地貌土壤情况，采用 EMTP 的 LCC 线路模型对输电线路进行了参数计算。其中输电线路为四分裂，导线型号为 LGJ-500/45 和 LGJ-500/35，避雷线导线型号为 LBGJ-120-40AC 及 GJ-80。等效线路平均参数见表 1。

表 1 线路等效模型平均参数

正序参数		零序参数	
$R_1 / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.015 1	$R_0 / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.159 4
$X_1 / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.266 6	$X_0 / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	1.179 6
$C_1 / (\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.013 8	$C_0 / (\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.008 7

可控电抗器额定容量下正序电抗为  $2520 \Omega$ ，零序电抗为  $1585.5 \Omega$ ，控制绕组短接后正序和零序电抗均为  $1585.5 \Omega$ ，此时  $G'=1$ ，可控电抗器输出容量为  $Q_L = 190.8$  Mvar，补偿度为  $T_k = Q_L/Q_C = 1.1357$ ,  $T_0 = 0.3657$ ，根据式(2)可以计算出最佳小电抗为  $X_N = 250 \Omega$ 。

#### 4.2 工频谐振过电压验算

根据规程规定，当超高压线路装设高压并联电抗器时，需对工频谐振过电压进行验算<sup>[19]</sup>。

当三右-江陵 500 kV 线路 II 回江陵线路侧带 120 Mvar 可控电抗器，非全相运行情况下将控制绕组短接时，断开相上的工频谐振过电压有效值见表 2。

表 2 工频谐振过电压计算结果 kV

小电抗/ $\Omega$	三右侧跳开，江陵侧		江陵侧跳开，三右侧	
	单相开断	两相开断	单相开断	两相开断
0	142.9	99.68	128.5	91.30
150	58.46	49.81	51.71	44.78
200	25.09	23.44	21.36	20.25
250	13.05	13.63	12.61	13.31
270	28.11	30.78	27.07	30.00
300	53.40	63.77	50.08	60.50

由表 2 可知，当三右-江陵 500 kV 线路 II 回江陵侧 120 Mvar 可控电抗器中性点小电抗取值范围为  $150 \sim 300 \Omega$  时，如果发生单相开断或两相开断，断开相上工频感应电压最大为 63.77 kV，不会发生工频谐振；当小电抗器故障退出，可控电抗器中性点直接接地时，线路非全相运行也不会发生工频谐振，但会在断开相上产生较高的工频感应电压。

#### 4.3 潜供电流和恢复电压

仿真中断路器不带合闸电阻，设接地时刻到两端断路器完全断开的间隔为 0.06 s；断路器断开后，可控电抗器三相控制绕组立即同时短路，即不考虑短路时的延时性和分时性。仿真计算中考虑潜供电流出现最大值的情况，即线路两端发生单相接地故障。分别计算可控电抗器在 25%、50%、75%、100%容量短接控制绕组后的潜供电流和恢复电压。研究经验和工程实际表明，并联电抗器中性点小电抗的取值范围较大，不一定选择全补偿小电抗，而以满足抑制工频谐振过电压和限制潜供电流的要求为原则。因此，中性点小电抗分别取 250、270、300  $\Omega$  进行对比研究，计算结果分别列于表 3、4 中。

由表 3、4 可以看出，当线路上无补偿装置时，三右侧发生单相接地故障，潜供电流有效值和恢复电

表3 潜供电流计算结果

短接绕组时可控电抗器的容量	A					
	250 Ω		270 Ω		300 Ω	
	三右	江陵	三右	江陵	三右	江陵
无补偿	20.10	22.26	20.10	22.26	20.10	22.26
25%	4.691	2.219	3.353	2.500	4.017	3.568
50%	3.698	2.170	4.218	2.867	5.371	4.260
75%	4.405	3.598	5.095	4.613	6.398	6.254
100%	5.734	5.201	6.642	6.367	8.168	8.161

表4 恢复电压计算结果

短接绕组时可控电抗器的容量	kV					
	250 Ω		270 Ω		300 Ω	
	三右	江陵	三右	江陵	三右	江陵
无补偿	105.30	95.08	105.30	95.08	105.30	95.08
25%	128.11	72.40	123.51	81.74	140.43	124.55
50%	88.23	56.11	94.32	76.52	118.52	121.32
75%	93.11	84.11	109.21	110.92	143.07	155.92
100%	126.32	146.70	152.79	175.33	198.02	220.75

压峰值分别为 20.10 A 和 105.3 kV；江陵侧发生单相接地故障，潜供电流有效值和恢复电压峰值分别为 22.26 A 和 95.08 kV。潜供电流较大，故障处的电弧不易熄灭，不利于采用单相自动重合闸。

采用短接控制绕组工作方式，一旦出现故障的情况，断路器跳闸（包括单相故障）时立即将可控电抗器的控制绕组短路。不论线路哪侧发生单相接地故障，可控电抗器都可以将潜供电流限制在 10 A 以内，自动重合闸时间可以取 0.5~0.6 s。恢复电压呈拍频波形，峰值比不装设并联电抗器时要高。当中性点小电抗取值为 250 Ω，额定容量下短接控制绕组时恢复电压的波形见图 6。

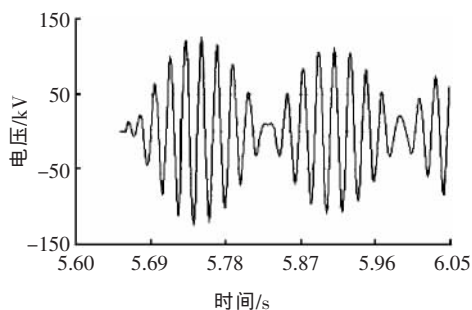


图6 恢复电压波形

#### 4.4 中性点小电抗器工频过电压

线路发生不对称故障或非全相运行时，三相电压不平衡，会在中性点小电抗上引起工频过电压。非全相运行和单相接地故障跳开三相线路时中性点小电抗上电压的有效值分别列于表 5、6 中。

由表 5 可见，当可控电抗器中性点小电抗取值 250、270、300 Ω，采用故障时短接控制绕组的工作方式，非全相运行时，可控电抗器中性点小电抗最高工频过电压为 40.45 kV。

由表 6 可见，当可控电抗器中性点小电抗取值

表5 非全相运行时中性点小电抗电压 kV

中性点小电抗	短接绕组时容量	非全相运行	
		三右侧接地	江陵侧接地
250 Ω	25%	35.38	35.38
	50%	35.56	35.49
	75%	35.97	35.95
	100%	36.79	36.81
270 Ω	25%	38.81	38.81
	50%	38.97	38.90
	75%	39.37	39.34
	100%	40.10	40.11
300 Ω	25%	44.51	44.51
	50%	44.61	44.58
	75%	44.98	44.99
	100%	45.45	45.45

表6 单相接地时中性点小电抗电压 kV

中性点小电抗	短接绕组时容量	单相接地跳开三相	
		三右侧接地	江陵侧接地
250 Ω	25%	5.124	55.93
	50%	5.130	56.04
	75%	5.134	56.26
	100%	5.140	56.53
270 Ω	25%	5.381	58.78
	50%	5.387	58.88
	75%	5.410	59.12
	100%	5.435	59.41
300 Ω	25%	5.763	63.01
	50%	5.769	63.09
	75%	5.780	63.33
	100%	5.819	63.67

250、270、300 Ω，采用故障时短接控制绕组的工作方式，发生单相接地故障跳开三相线路时，可控电抗器中性点小电抗最高工频过电压为 63.67 kV。

#### 4.5 潜供电流仿真研究结论

根据上述计算结果，三右-江陵 500 kV 线路可控电抗器中性点小电抗取值分别为 250、270、300 Ω 时，潜供电流均小于 10 A，远低于不装设高抗的情况。综合工频谐振过电压验算和潜供电流计算的结果，小电抗取 250 Ω 时，潜供电流和恢复电压最低，与理论计算的最佳值相符。小电抗绝缘水平可取 66 kV。

## 5 结论

(1) 分析了超高压线路中潜供电流产生的机理及抑制措施。提出了用可控电抗器代替固定并联电抗器，配合合适的中性点小电抗来抑制潜供电流的方法。

(2) 介绍了可控电抗器的结构和基本工作原理。列出了中性点小电抗的理论计算公式，并根据可控电抗器的参数计算了小电抗的理论最佳值。

(3)建立 EMTP 模型,仿真计算了可控电抗器抑制潜供电流的效果。结果表明,由于容量可以调节,对于不同容量下发生单相接地故障时,对应潜供电流的大小也不同,但均比无高抗时潜供电流要低得多。因而,选择合适的小电抗值,可控电抗器能显著地限制潜供电流,可以采用单相快速自动重合闸。

(5)研究的结论验证了超高压可控电抗器抑制潜供电流的有效性。

参考文献:

[1] AL-RAWI A, DEVANEY M. Measurement of Secondary Arc Current in Transmission Lines Employing Single Phase Switching [C]// Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997: 297-301.

[2] BAN G, PRIKLER L, BANFAI G. Testing EHV Secondary Arcs[J]. Power Tech. Proceedings, 2001, 4(10-13): 6.

[3] 陈亚伦,李志国,伊敏-冯屯 500 kV 同塔双回线路不平衡度感应电流及潜供电流研究[J]. 电网技术, 1995, 19(6): 13-17.

[4] ATMURI S R, THALLAM R S, GERLACH D W, et al. Neutral Reactors on Shunt Compensated EHV Lines[C]// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 1994: 121-128.

[5] 田翠华,陈柏超.可控电抗器在 750 kV 系统中的应用 [J]. 电工技术学报, 2005, 21(1): 31-37.

[6] 周勤勇,郭强,卜广全,等.可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 1-6.

[7] 周孝信,郭剑波,胡学浩,等.提高交流 500 kV 线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 1-6.

[8] 李达义,陈乔夫,贾正春.基于磁通可控的可调电抗器的新原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120.

[9] 陈柏超,陈维贤.超高压可控电抗器限压特性及谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 122-125.

[10] TAVARES M C, PORTELA C M. Transmission System Parameters Optimization-sensitivity Analysis of Secondary Arc Current and Recovery Voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004(19): 1464-1471.

[11] SHI Wei, LI Fan, HAN Yan-hua, et al. The Effect of Ground Resistance on Secondary Arc Current on an EHV Transmission Line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005(20): 1502-1506.

[12] 张丽,徐玉琴.并联电抗器在超(特)高压电网中应用及发展[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 75-78.

[13] ДОРОЖКОЛИ. Compare Analysis with Different Structure of Control lable Reactors [J]. Электрическч Естанцич (Power Plant), 1988(4): 19-24.

[14] 清华大学工业自动化系.饱和电抗器原理与设计 [M]. 北京:清华大学出版社,1977.

[15] FENG Gui-hong, WANG Feng-xiang, ZHANG Bing-yi. Modeling and Characteristics of a Novel Magnet Saturation Controllable Reactor[C]// The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive System, 2003: 313-315.

[16] 陈柏超.新型可控饱和电抗器理论及应用 [M]. 武汉水利电力大学出版社, 1999.

[17] 刘涤尘,陈柏超,田翠华,等.新型可控电抗器在电网中的应用与选型分析[J]. 电网技术, 1999, 23(2): 52-58.

[18] 陈禾,陈维贤.并联电抗器中性点小电抗的选择 [J]. 高压电压技术, 2002, 28(8): 9-10.

[19] SDJ 161-85. 电力系统设计技术规程[S].

(上接第 21 页)

[2] MANGANARO S, ROVELLI S. A New Circuit for Synthetic Auto-reclosing Test Duties under Short Circuit Condition on High-power Circuit-breakers [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1620-1630.

[3] SHENG B L. Design Consideration of Weil-dobke Synthetic Testing Circuit for the Interrupting Testing of HV AC Circuit Breakers [C]// Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2001: 295-299.

[4] 庄稼人,党晓鹰.在最大预燃弧条件下进行合成关合试验的合成关合回路[J]. 高压电器, 1992, 28(3): 14-20.

[5] 范兴明,邹积岩,丛吉远.基于真空触发开关的合成关合试

验回路及其控制策略[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 434-437.

[6] FAN Xing-ming, QIU Hong-hui, LIAO Min-fu, et al. Verification of a Fast Making Switch Based on Triggered Vacuum Switch and Vacuum Circuit Breaker [C]// Proceedings 22th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006: 240-243.

[7] 范兴明,邹积岩,丛吉远.全电压关合试验控制策略及其实现[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 8-13.

[8] VANDER S L, DAMSTRA G C, KEMPEN H W, et al. Synthetic Test Methods: Experiences and Future Developments[C]// CE/SC: 13, Paris, 1992: 13-203.

简讯

陕西省电工技术学会第四次会员代表大会召开

陕西省电工技术学会第四次会员代表大会于 2009 年 3 月 20 日在西安市召开。参加会议的有陕西省科协副主席刘亚光、中国电工技术学会高工王天虹、西安交通大学电气工程学院副院长荣命哲、西北电网有限公司副经理李新建、西安电力机械制造公司副总经理裴振江、西安高压电器研究院有限责任公司经理郑军以及来自陕西省电器设备制造、电力建设和运行、大专院校、科研院所等 36 个单位的 85 位代表。

会议由郑军常务副理事长主持,裴振江理事长做了“陕西省电工技术学会第三届理事会工作报告”,元复兴秘书长和姚君瑞副秘书长分别介绍了陕西省电工技术学会换届方案及其说明和“陕西省电工技术学会章程”修改的说明。会议选举产生了陕西省电工技术学会第四届理事会。