

# 超高压磁控式并联电抗器仿真建模方法

邓占锋, 王轩, 周飞, 雷晰, 于坤山, 邱宇峰

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Modeling of Extra-high Voltage Magnetically Controlled Shunt Reactor

DENG Zhan-feng, WANG Xuan, ZHOU Fei, LEI Xi, YU Kun-shan, QIU Yu-feng

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** From power system point of view, the multiple functions and application prospects of controllable shunt reactor in EHV and UHV power grid are analyzed; with 500kV magnetically controlled shunt reactor (MCSR) demonstration project in Jiangling converter station, China, the magnetic circuit structure and working principles of MCSR are analyzed, and the mathematic model of MCSR are deduced; on the basis of above, a new method of modeling complex magnetic circuit - magnetic circuit decomposition approach is proposed, and simulation model of MCSR is established. In order to verify the accuracy of the simulation model, the test results of 10 kV prototype and simulation results are compared, the experiments verify the accuracy of the simulation model. The proposed magnetic circuit decomposition approach is clear in principle, easy in modeling, precise in simulation result, applicable in engineering, suitable for power system electromagnetic transient calculation, and provides necessary simulation means for UHV and EHV MCSR analysis.

**KEY WORDS:** extra-high voltage; magnetically controlled shunt reactor; controllable shunt reactor; simulation model; magnetic circuit decomposition

**摘要:** 从系统角度分析了可控电抗器在超高压和特高压电网中的多种作用和应用前景; 结合江陵换流站 500 kV 磁控式并联电抗器示范工程, 分析了其磁路结构和工作原理, 通过理论推导得出了磁控式可控电抗器的数学模型; 在此基础上, 提出了复杂磁路建模新方法——磁路分解法, 并建立了磁控式并联电抗器(magnetically controlled shunt reactor, MCSR)仿真模型。文章给出了 10 kV MCSR 原理样机的试验结果, 并与软件仿真结果进行对比分析, 验证了仿真模型的正确性。文中提出的磁路分解仿真建模法具有原理清晰、建模简便、模型精确、工程适用的特点, 适用于电力系统电磁暂态计算, 为超/特高压 MCSR 的分析提供了必要的仿真手段。

**关键词:** 超高压; 磁控式并联电抗器; 可控并联电抗器; 仿真模型; 磁路分解

## 0 引言

为解决煤炭、水利等一次能源与负荷中心分布极不平衡的问题, 我国交流电力系统骨干网架宜采用超/特高压紧凑型线路实现远距离、大容量的输电, 达到资源的集约配置<sup>[1]</sup>。

超/特高压交流输电线路巨大的容性充电功率、剧烈的潮流变化以及有限的绝缘裕度给系统的无功调节、过电压抑制提出了较高的要求。普通高压并联电抗器、可投切低压并联电容器和电抗器组、发电机进相运行和静止无功补偿器(static var compensator, SVC)等传统的无功补偿装置大都无法同时满足无功调节和过电压抑制的需要<sup>[2]</sup>。

在超/特高压电网中, 可控并联电抗器(controlled shunt reactor, CSR)可简化系统无功电压控制、抑制工频过电压和操作过电压、消除发电机自励磁、动态补偿线路充电功率、抑制潜供电流、阻尼系统谐振等, 能满足系统多方面需求, 因而具有非常广阔的应用前景<sup>[3-5]</sup>。

适合于超/特高压电网的可控并联电抗器有磁控式并联电抗器(MCSR)、分级式可控并联电抗器(stepped controlled shunt reactor, SCSR)和晶闸管控制变压器(thyristor controlled transformer, TCT)等多种形式<sup>[1,6]</sup>。我国自主研发的首套 500kV SCSR和首套 500kV MCSR分别于 2006 年 9 月在山西忻都(忻州)开关站、2007 年 9 月在湖北江陵(荆州)换流站投运成功, 并在系统运行中发挥了重要作用, 为我国特高压可控电抗器的研制、运行与维护积累了宝贵经验。

本文将首先分析可控电抗器在超高压和特高

压电网中的作用及应用前景,结合 500kV 江陵换流站 MCSR 示范工程分析 MCSR 磁路结构、工作原理及特点,推导 MCSR 数学模型,然后提出复杂磁路建模新方法——磁路分解法,并建立基于 PSCAD/EMTDC 的仿真模型,通过对软件仿真结果和 10kV MCSR 原理样机的试验结果进行对比分析来验证模型的正确性。

## 1 CSR 在超/特高压电网中的作用

CSR 是一种基于晶闸管的新型 FACTS 装置,其电抗值可在线调节,满足多方面的系统需求。在超/特高压电网中,CSR 具有以下主要作用<sup>[1-8]</sup>:

1) 简化无功、电压控制措施。以 MCSR 为例,其出力可在 2%~100% 额定容量之间连续变化。根据系统需求改变 MCSR 的出力可以将输电线路广义自然功率调节为线路实际自然功率的 30%~100%。在电网潮流的正常变化范围内,无需配置或使用其他无功电压调节手段,从而简化无功、电压控制措施。

2) 抑制工频过电压。我国规定超高压电网母线侧工频过电压不得大于 1.3 pu,线路侧不得大于 1.4 pu;特高压电网不大于 1.3 pu,个别情况下线路侧可短时(持续时间不大于 0.3 s)在 1.4 pu 以下<sup>[1]</sup>。电网正常运行时,CSR 的容量可根据线路传输的功率自动平滑调节,稳定电压水平;电网非全相运行、甩负荷时,CSR 可快速调整到系统所需的容量,甚至强补无功,满足系统限制工频过电压的要求。

3) 消除发电机自励磁。发电机带容性负荷(如空载线路)运行时,在容性电流的助磁作用下,有可能产生自励磁。CSR 可以自动调整补偿容量,消除产生自励磁的条件,为大机组直接接入超/特高压电网创造条件。

4) 抑制操作过电压。我国规定超高压电网 330kV 系统操作过电压不得超过 2.2 pu,500kV 不得超过 2.0 pu,750kV 不得超过 1.8 pu;特高压电网要求更为严格。具有基础补偿容量的 CSR 可降低系统的操作过电压水平。此外,CSR 具备较强的过电压和过负荷能力,可有效限制线路计划性合闸、重合闸、故障解列等造成的操作过电压。

5) 动态补偿线路容性功率。为确保系统稳定、经济运行,电力系统必须储备充足的动态无功。对于超/特高压电网,大干扰电压稳定对动态无功的需求更为迫切。以 SCSR 为例,动态响应速度可达 10~20ms,CSR 已成为超/特高压输电电网理想的无

功补偿设备。

6) 抑制潜供电流。提高单相重合闸的成功率可有效提高超/特高压系统的可靠性和稳定性。CSR 配合合适的中性点小电抗和一定的控制方式,可快速地把潜供电流限制在 20A 以内,促进电弧熄灭,可避免采用价格昂贵的高速接地开关(high speed grounding switch, HSGS)。

综上所述,采用 CSR 主要能解决长距离重载线路限制过电压和无功补偿的矛盾,并能满足系统多方面需求,在超/特高压输电系统采用 CSR 技术已成为发展趋势。

## 2 MCSR 原理及应用

### 2.1 MCSR 本体结构及接线方式

以峡江 II 线江陵侧 500kV MCSR 示范工程为例,超高压大容量 MCSR 本体通常采用三相电抗器。各相电抗器主铁心一分为二,在每个分铁心上绕有网侧绕组(即工作绕组)和励磁绕组(即控制绕组)。各分支工作绕组并联后星形连接,中性点经小电抗接地;A1、B1、C1 相控制绕组与 A2、B2、C2 相控制绕组分别首尾相连后再反向并联,开口处接入外加直流励磁电源;三相联动开关分别并联在相应的控制绕组两端。MCSR 单相本体结构如图 1 所示,一次接线如图 2 所示,图 2 中: $L_{A1}$ 、 $L_{A2}$ 、 $L_{B1}$ 、 $L_{B2}$ 、 $L_{C1}$ 、 $L_{C2}$  为电抗器各分支工作绕组; $L_{a1}$ 、 $L_{a2}$ 、 $L_{b1}$ 、 $L_{b2}$ 、 $L_{c1}$ 、 $L_{c2}$  为电抗器各分支控制绕组; $K_{a1}$ 、 $K_{b1}$ 、 $K_{c1}$  与  $K_{a2}$ 、 $K_{b2}$ 、 $K_{c2}$  分别构成三相联动旁路开关; $RF$  为可控整流设备; $L_n$  为中性点小电

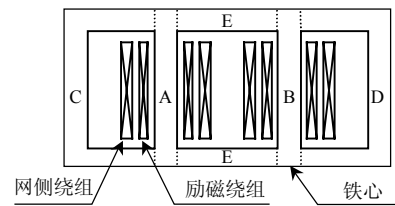


图 1 单相 MCSR 铁心结构及绕组布置

Fig. 1 Iron core structure and coils arrangement of single phase MCSR

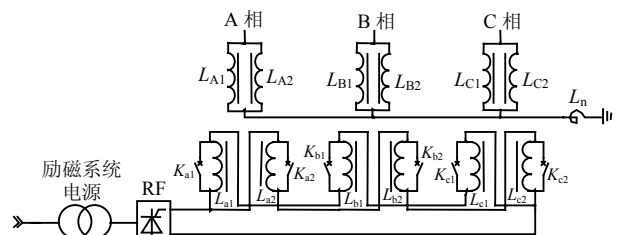


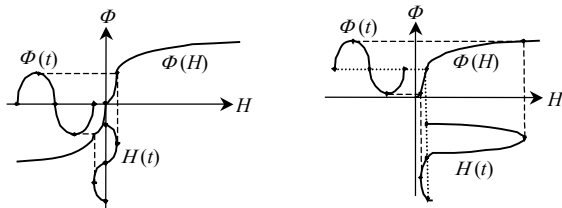
图 2 MCSR 一次电气接线图

Fig. 2 Primary circuit of MCSR

抗。如果 MCSR 还有用于滤波、容性无功补偿的三次绕组，MCSR 还可实现容性无功功率输出。

2.2 MCSR 工作原理

MCSR的基本工作原理是：通过改变直流励磁的大小，改变铁心的磁饱和度和，进而改变等效磁导率，从而平滑地改变电抗值和电抗容量<sup>[8-9]</sup>。MCSR的容量取决于铁心在一个周期中的磁饱和程度 $\beta$ 。 $\beta$ 定义为分铁心柱在一个工频周期内的饱和时间(用电角度表示)。当直流励磁电流为0时，铁心柱在整个工频周期中不饱和，不考虑剩磁，此时 $\beta=0$ ，电抗器处于无励磁状态，容量为最小；随着控制电流增加，铁心柱的饱和时间加大，电抗器的容量亦增加。当一个工频周期中分铁心柱全部饱和时，对应 $\beta=2\pi$ ，电抗器的容量也达到最大值。图3给出了直流励磁电流为0和不不为0时分铁心磁通 $\Phi$ 和磁场强度 $H$ 的波形示意图。MCSR具有容量大、范围连续可调、谐波含量小、稳态控制特性好的性能特点。作者已在文献[8]中详细阐述了MCSR的工作机理及其稳态特性，在此不再论述。



(a) 直流励磁电流为0 (b) 直流励磁电流不为0

图3 分铁心 $\Phi$ - $H$ 曲线示意图

Fig. 3 Relation between  $\Phi$  and  $H$  in branch coil

在系统暂态过程中，旁路开关快速闭合，使电抗器控制绕组短路。此时电抗器的运行不依赖于整流系统和控制系统的运行模式，而类似于自饱和电抗器<sup>[10-11]</sup>，输出无功功率发生突变甚至超过额定容量，抑制过电压。

2.3 MCSR 应用情况

在国外，目前仅CERC(Controllable Electric Reactors Consortium of Russia & the CIS)能够设计、生产500kV及以下电压等级的MCSR，并在前苏联地区国家的电网中获得了应用<sup>[1,9,12]</sup>。已投运的110kV及以上电压等级MCSR典型工程业绩如表1所示。

前苏联地区应用的MCSR多与电容器组配合，主要起到无功调节的作用，欧美等国家解决类似问题通常采用SVC。结合我国电网应用需求，采用MCSR主要是为了解决重载长线抑制过电压和无

表1 前苏联地区MCSR在110kV及以上高压系统的典型应用情况

Tab. 1 Typical application of MCSR to 110kV and above power system in ex-USSR region

电压等级/kV	110	220	330	500
额定电压/kV	121	220	347	525
额定输出容量/Mvar	25(三相)	100(三相)	180(三相)	60(单相试验样机)
容量调节范围/Mvar	0.25~30	-2.5~113	-5~195	0.2~81
响应时间/s	2.0	0.4	0.7	0.3
无励磁状态损耗/kW	25	87.7	138	90
额定损耗/kW	200	558	753	465
控制系统容量/MVA	0.16	1	1	1.8
最大谐波电流含量	<4%	<2%	<2%	
总重/t	69	183	320	138
投运时间	1999年	2002年	2003年	—
安装地点	Kudymkar 变电站	Chita 变电站	Baranovichi 变电站	Bely Rust 变电站

功补偿间的矛盾，因此在我国超/特高压电网中具有更广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。

3 MCSR 建模

3.1 概述

MCSR 本体类似于变压器，但铁心结构和接线方式比较特殊，且一次绕组与二次绕组间不存在能量的传递，因而不同于变压器模型。现有的国内外电力仿真软件尚未集成MCSR模型，无法满足系统分析的需要。

为便于精确的仿真研究，MCSR模型应考虑每相各绕组之间的电磁耦合、铁心的饱和及损耗，为此本文提出磁路分解建模法<sup>[13]</sup>，以实现在现有仿真环境(如PSCAD/EMTDC)下的仿真研究，为超/特高压MCSR系统分析提供必要的仿真手段。

3.2 MCSR 数学建模

为便于分析，单相四柱式MCSR本体各物理量及正方向定义如图4所示。记绕组匝数为 $N_{mn}$ ，电流为 $i_{mn}$ ，电压为 $u_{mn}$ ，漏磁通为 $\Phi_{mn}$ ，漏电感为 $L_{mn}$ ，电阻为 $r_{mn}$ 。上述各变量下标 $m=1$ 表示左心柱绕组，

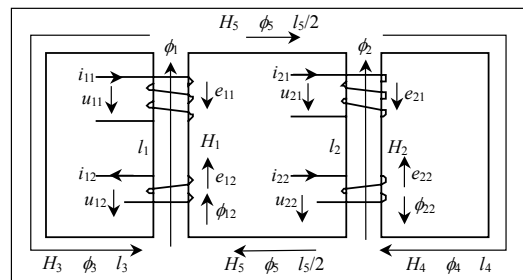


图4 MCSR 各物理量及正方向定义

Fig. 4 Physical quantities and forward directions in MCSR

$m=2$  表示右心柱绕组；下标  $n=1$  表示网侧绕组， $n=2$  表示励磁绕组。 $\Phi_k$ 、 $H_k$ 、 $l_k(k=1,2,\dots,5)$  分别为图中所示磁路的主磁通、磁场强度和等效磁路长度。

根据确定的物理量正方向列写绕组电压方程为

$$u_{11} = r_{11}i_{11} + N_{11} \left( \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d\Phi_{11}}{dt} \right) \quad (1)$$

$$u_{12} = -r_{12}i_{12} - N_{12} \left( \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d\Phi_{12}}{dt} \right) \quad (2)$$

$$u_{21} = r_{21}i_{21} + N_{21} \left( \frac{d\Phi_2}{dt} + \frac{d\Phi_{21}}{dt} \right) \quad (3)$$

$$u_{22} = r_{22}i_{22} + N_{22} \left( -\frac{d\Phi_2}{dt} + \frac{d\Phi_{22}}{dt} \right) \quad (4)$$

应用磁路的基尔霍夫第一定律列写节点方程为

$$\Phi_1 = \Phi_3 + \Phi_5 \quad (5)$$

$$\Phi_4 = \Phi_2 + \Phi_5 \quad (6)$$

应用磁路的基尔霍夫第二定律列写回路方程为

$$H_1l_1 + H_3l_3 = N_{11}i_{11} + N_{12}i_{12} \quad (7)$$

$$H_2l_2 + H_4l_4 = N_{21}i_{21} - N_{22}i_{22} \quad (8)$$

$$H_3l_3 = H_4l_4 + H_5l_5 \quad (9)$$

此外，各段磁路还需满足相应的磁化关系曲线  $\Phi_k = f_k(H_k)$ ， $k=1,2,\dots,5$ 。

### 3.3 MCSR 仿真建模

常规的电力仿真软件(如 PSCAD/EMTDC)中没有三相四柱四绕组结构的 MCSR 模型。为便于 MCSR 的仿真研究，本文提出基于磁路分解的建模方法。令

$$i_{11} = i'_{11} + i''_{11} \quad (10)$$

$$i_{21} = i'_{21} + i''_{21} \quad (11)$$

且满足以下约束条件

$$H_1l_1 = N_{11}i'_{11} - N_{12}i_{12} \quad (12)$$

$$H_2l_2 = N_{21}i'_{21} - N_{22}i_{22} \quad (13)$$

可得其余磁路的磁位降表达式

$$H_3l_3 = N_{11}i''_{11} \quad (14)$$

$$H_4l_4 = N_{21}i''_{21} \quad (15)$$

$$H_5l_5 = N_{11}i''_{11} - N_{21}i''_{21} \quad (16)$$

根据绕组电压方程(1)~(4)以及各磁路磁位降表达式(12)~(16)构建 MCSR 的五分段磁路模型如图 5 所示。图中： $e$  为相应的绕组感应电压；磁路 1、2、5 可用双绕组饱和变压器模型表示，磁路 3、4 可用饱和电抗器(也可看作副边开路的饱和变压器)表示，即 A、B、C、D、E 分别代表左心柱、右心柱、左旁柱及左上下轭、右旁柱及右上下轭、中间上下轭磁路，磁化特性与原模型相同，并满足所有方程。

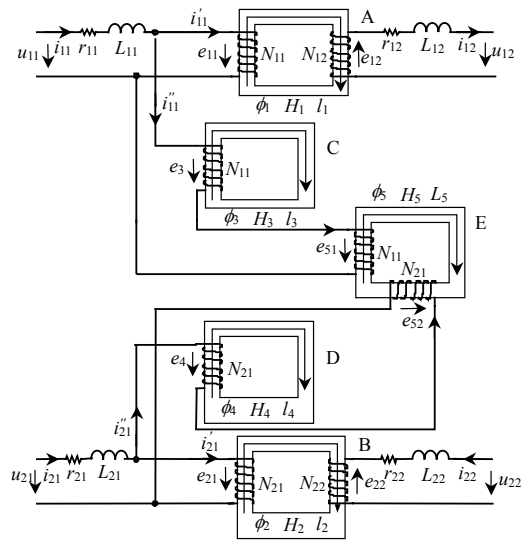


图 5 MCSR 五分段磁路模型

Fig. 5 Five-segment magnetic path model of MCSR

各段铁心磁路只需考虑铁心饱和及铁损；而变压器 A、B 的漏磁与绕组电阻的作用已体现在外电路中，无需重复计及。

为了充分考虑每相各绕组之间的磁耦合，一般可采用统一磁等效电路法(unified magnetic equivalent circuit, UMEC)求解<sup>[14]</sup>。在处理铁心饱和时，通常有以下 2 种方法：

1) 补偿法。将变压器非线性励磁支路用一受控电流源  $I_s$  来模拟。该方法首先由励磁绕组两端电压计算出铁心磁通，然后根据  $\Phi$ - $I$  磁化曲线计算出励磁电流，反复迭代求解确定  $I_s$ 。该方法中，规格化的  $\Phi$ - $I$  磁化曲线与变压器实际励磁特性会有所差别，因而在 MCSR 建模中受到一定限制。

2) 分段线性化法。变压器  $\Phi$ - $I$  磁化曲线用几段具有不同斜率的直线段表示，分段数可任意选取。显然分段数越多越能准确反映实际的非线性特性，但对于许多工程问题，只要少量的分段就可以有足够的计算精度，使暂态计算得到简化。工程计算所需的铁心磁特性及参数可应用检流计法、动态磁性测试仪等获得，该方法较适合 MCSR 建模。

新建模型引入了  $i'_{11}$ 、 $i''_{11}$ 、 $i'_{21}$  和  $i''_{21}$  4 个变量以及式(10)~(13)4 个方程。可以证明，只要满足初始条件  $\phi_1(0) = \phi_3(0) + \phi_5(0)$  和  $\phi_2(0) = \phi_4(0) - \phi_5(0)$ ，磁路分解法构建的新模型与四柱裂相式 MCSR 模型完全等价。合理设置初始磁通就能够保证 MCSR 模型适用于 0Hz~20kHz 频率范围内的电磁暂态研究。通过磁路分解，构建的 MCSR 模型可由常规饱和变压器、饱和电抗器组合实现，而无需单独开发 MCSR 模型。因此，本方法具有原理清晰、建模简便的特点。

## 4 仿真与试验

为验证基于磁路分解法的 MCSR 仿真模型的正确性,一方面本文研制了 10 kV MCSR 物理模型试验样机,其额定电压为 10 kV,额定容量为  $3 \times 400$  kvar,短路阻抗为 67.32%,接线方式如图 2 所示;同时利用本文提出的建模方法在常用的电力系统电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC 中创建了 MCSR 专用模型,仿真模型参数与物理模型磁路参数一致,并考虑了绕组电磁耦合、磁路非线性与损耗。

典型仿真波形及试验波形如图 6 所示,各小图左边为仿真波形,右边为样机试验波形。基于磁路分解建模方法的仿真波形包含工频及各次谐波分量,与试验波形相比最大误差不超过 5%,表明该方

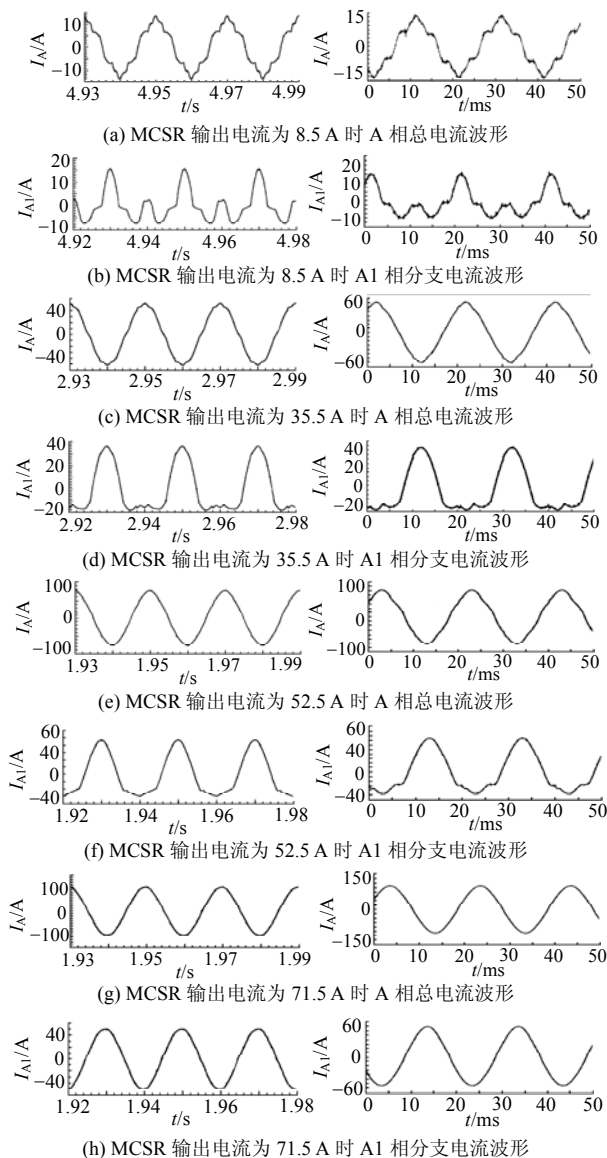


图 6 MCSR 仿真与试验波形对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental waveforms of MCSR

法具有模型精确、工程适用的特点。仿真模型在江陵换流站 500 kV MCSR 工程中同样得到了验证<sup>[15]</sup>。

本文提出的基于磁路分解法的仿真模型反映了 MCSR 本体的特性,结合励磁系统、旁路开关等辅助系统构建的完整的 MCSR 仿真模型已成功用于江陵换流站 500 kV MCSR 工程中。该模型用于电磁暂态研究时,包括了无故障甩负荷及单相接地甩负荷时工频过电压校核, MCSR 中性点小电抗选择、中性点绝缘水平设计及避雷器配置,单相重合闸过程对潜供电流及恢复电压的影响,线路非全相运行时谐振过电压校核,合空线及单相重合闸过程操作过电压校核等各项研究内容。受篇幅所限,以上研究成果未在本文列出。

## 5 结论

本文分析了可控电抗器在超高压和特高压电网中的作用及应用前景,推导了 MCSR 的数学模型,提出复杂磁路建模新方法——磁路分解法,并创建了仿真模型,试验结果验证了仿真模型的正确性。本文提出的磁路分解仿真建模法具有原理清晰、建模简便、模型精确、工程适用的特点,适用于电力系统电磁暂态计算,为超/特高压 MCSR 的系统分析提供了必要的仿真手段。

## 参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 2-6, 68, 156-158, 411-412.
- [2] 邱宇峰. 国家电网公司科技项目可行性研究报告——超高压可控电抗器技术研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [3] Belyaev A N, Smolovik S V. Steady-state and transient stability of 500kV long-distance AC transmission lines with magnetically controlled shunt reactors[C]. IEEE Power Tech Conference, Russia, 2005.
- [4] 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.  
Zhou Qinyong, Guo Qiang, Bu Guangquan, et al. Application of controllable reactors in China's power grid at extra and ultra voltage level[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 1-6(in Chinese).
- [5] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999: 1-8.
- [6] 潘发君, 周腊吾, 黄利军, 等. 可控电抗器在特高压输电系统中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2007, 14(2): 63-64.  
Pan Fajun, Zhou Lawu, Huang Lijun, et al. Application of controlled reactor in ultra-high voltage-transmission system [J]. Electronic Instrumentation Customer, 2007, 14(2): 63-64(in Chinese).
- [7] 陈维贤, 陈禾, 鲁铁成, 等. 关于特高压可控并联电抗器[J]. 高压技术, 2005, 31(11): 26-27.  
Chen Weixian, Chen He, Lu Tiecheng, et al. Ultra-high voltage controllable shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 26-27(in Chinese).
- [8] 王轩, 邓占锋, 于坤山, 等. 超高压磁控式并联电抗器稳态特

- 性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 104-109.  
Wang Xuan, Deng Zhanfeng, Yu Kunshan, et al. Steady-state characteristics of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 104-109(in Chinese).
- [9] 钟俊涛, 安振, 章海庭. 超高压可控并联电抗器的研发及制造[J]. 电力设备, 2006, 7(12): 7-10.  
Zhong Juntao, An Zhen, Zhang Haiting. R & D and manufacturing of EHV controllable shunt reactor[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(12): 7-10(in Chinese).
- [10] 蔡宣三, 高越农. 可控饱和电抗器原理、设计与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 54-73.
- [11] 国家电网公司建设运行部, 中国电力科学研究院. 灵活交流输电技术在国家骨干电网中的工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 37-39.
- [12] Bryanteev A, Dorofeev V, Zilberman M, et al. Magnetically controlled shunt reactor application for AC HV and EHV transmission lines[C]. CIGRE, 2006, Paris.
- [13] 邓占锋, 于坤山, 王轩, 等. 一种磁控式并联电抗器数字仿真建模方法: 中国, 200810056973.1[P].
- [14] Manitoba HVDC Research Center Inc. . PSCAD V4. 2. 0 online help system[Z]. 2003.

- [15] 中国电力科学研究院, 500 kV 峡江 II 线可控高抗工程系统调试报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.



邓占锋

收稿日期: 2008-08-31。

**作者简介:**

邓占锋(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统和电力电子技术的研究与开发工作;

王轩(1978—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统和电力电子技术的研究与开发工作,

E-mail: wangxuan@epri.ac.cn;

周飞(1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统和电力电子技术的研究与开发工作;

雷晰(1974—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统和电力电子技术的研究与开发工作;

于坤山(1963—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统和电力电子技术的研究工作;

邱宇峰(1960—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事继电保护、电力电子技术的研究工作。

(编辑 李兰欣)