

特高压磁阀式可控电抗器自抗扰 DSP 控制系统

王晓雷¹, 吴必瑞², 毋炳鑫¹

(1. 中原工学院电子信息学院, 河南 郑州 450007; 2. 宁德师范高等专科学校物理系, 福建 宁德 352100)

摘要: 特高压磁阀式可控并联电抗器采用自抗扰控制离散算法可产生良好调节特性, 提高特高压交流输电系统的无功平衡能力、提高电网的稳定性和供电质量。采用 Matlab2008A 和 TMS320F28335 高速浮点 DSP 为核心器件半实物仿真装置, 对特高压输电系统进行了建模仿真和实时控制。试验结果表明, 该控制算法可以适应磁阀式可控并联电抗器复杂非线性的控制特点, 满足特高压线路中的无功功率高速响应要求。理论分析得到了在不同负载特性和全补偿条件下, 特高压磁阀式可控电抗器的控制规律, 为该装置工程设计提供了理论基础。

关键词: 特高压; 磁阀; 可控电抗器; DSP; 自抗扰控制

Application of UHV magnetic-valve controllable reactor based on auto-disturbance rejection floating point DSP

WANG Xiao-lei¹, WU Bi-ru², WU Bing-xin¹

(1. Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Ningde Teachers College, Ningde 352100, China)

Abstract: The UHV magnetic-valve controllable parallel reactor(MVCR) adopts auto-disturbance rejection disperse arithmetic, which can produce favorable regulation characteristics and improve UHV AC transmission power, system stability and the quality of power supply. This paper adopts auto-disturbance rejection controller of floating point DSP TMS320F28335 as its hardware-in-the-loop simulation device and MATLAB2008A to model and simulation and real-time control for UHV transmission system. Test results show that the control algorithm is adaptive to the magnetic valve-controlled parallel reactor complex nonlinear control features, moreover, it is in response to high-speed reactive power requirements in the UHV lines. Theoretical analysis predicts the regulation of UHV magnetic-valve controllable parallel reactor controller under different load characteristics and full compensation conditions, meanwhile, it provides theory foundation for this device project.

Key words: UHV; magnetic-valve; controllable reactor; DSP; auto-disturbance rejection controller

中图分类号: TM472 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0046-05

0 引言

特高压输电线路的无功补偿仅依靠固定高压并联电抗器加低压无功补偿设备的模式不够灵活方便。采用可控电抗补偿代替固定电抗补偿, 则能兼顾工频过电压限制和无功功率的调节。俄罗斯和印度研制并采用了可控高压电抗器, 其类型包括磁阀式可控电抗器(MVCR)和变压器式可控电抗器(TCSR)两种。至今, 俄罗斯有 500 kV 磁阀式可控电抗器在试运行。在国内的特高压磁阀式可控电抗器研究方面, 相关科研机构 and 高校都开展了广泛的研究。文献[1]提出了应用 MVCR 是解决特高压输电的无功平衡和工频过电压的优选方案, 文献[2-3]提出了晋东南-南阳-荆州特高压试验线路的并联电抗器容量和设置方案, 文献[4]提出了 MVCR

的模型试验研究和工业装置的试验数据和结果。而对于特高压的过电压暂态过程, 文献[5~8]定性提出系统过电压的分类和产生原因。

但是, 目前国内外对于特高压 MVCR 在线运行的暂态过程分析, 特别是结合特高压交流输电系统的设计参数, 有针对性的进行实时控制条件下的半实物仿真, 涉及的文献较少。而半实物仿真方法对于特高压 MVCR 的工业应用, 是一个高效率的设计方法。

由于特高压输电线路本身的复杂性, 实现的磁阀式可控电抗器的整合功能使得应用它的控制系统也非常复杂。如果采用常规的 PI 控制, 当等效参数测量不准确或发生变动时, 控制器的性能会变差甚至不稳定。模型参考自适应控制对负载的快速变化特别敏感; 模糊控制由于复杂模糊规则的相互作用,

致使控制效果不够理想;而神经网络控制器算法相对复杂,很少应用在实际的工业控制过程中。对此,文中根据磁阀式可控电抗器的特点,采用了 Matlab2008A 和 TMS320F28335,构成了特高压交流输电系统和磁阀式可控电抗器模型半实物仿真系统。实验结果表明 ADRC 是一种不依赖于系统模型的新型非线性控制器,具有超调低、收敛速度快、精度高、抗干扰能力强及算法简单等特点,在控制对象的参数发生变化或有不稳定性扰动时具有较强的自适应性和鲁棒性^[9,10]。

1 DSP控制的磁阀式可控电抗器

可控电抗的调节方式是,线路输送功率小时,电抗补偿容量处于最大值,限制线路电压的升高。随着线路输送功率的增加平滑减少电抗的补偿容量,使线路串联电抗吸收的无功主要由并联电容产生的无功功率来平衡;当三相跳闸甩负荷时,快速反应增大电抗补偿容量来限制工频过电压。

磁阀式可控电抗器的铁心截面积具有减小的一段,在整个容量调节范围内。只有小面积一段磁路饱和,其余段均处于未饱和和线性状态,通过改变小截面段磁路的饱和程度来改变电抗器的容量^[5]。磁阀式可控电抗器制造工艺简单,成本低廉,对于提高电网的输电能力,调整电网电压,补偿无功功率,以及限制过电压都有非常大的应用潜力。

以晋东南-南阳-荆门交流特高压的特高压示范工程为例,DSP控制的磁阀式可控电抗器的结构图如图1所示。其中半实物仿真系统采用数字信号处理器TMS320F28335浮点处理器。其可以运行在150 MHz频率下,具有18 k片内SRAM,128 k零等待RAM,128 k片内Flash memory,16路12 bit A/D和16路PWM等功能。可采用16 bit 的高精度片外ADC模块能实现模数转换,对电网的电流信号、电压信号经调理电路后实现高精度的测量。F28335对待测信号进行采样后,通过软件实现数字低通滤波,通过采集的瞬时无功信号进行分析,计算结果控制输出。调节可控硅的触发导通角来改变控制电流的大小,以改变铁芯的磁饱和度,达到平滑地调节可控电抗器容量的目的。最后采用RS-485通信实现F28335与计算机之间的通信,通过上位机运行软件进行监测和控制^[11]。

其等效图如图1所示,从图中可以看出,通过等效控制电压的大小 u_2 控制等效电流 i_2 的大小,可控制可控电抗器 L_{11} 、 L_{12} 、 L_{21} 、 L_{22} 的大小,从而控制磁阀式可控电抗器的伏安工作特性 $i_1 = f(u_1)$ 。

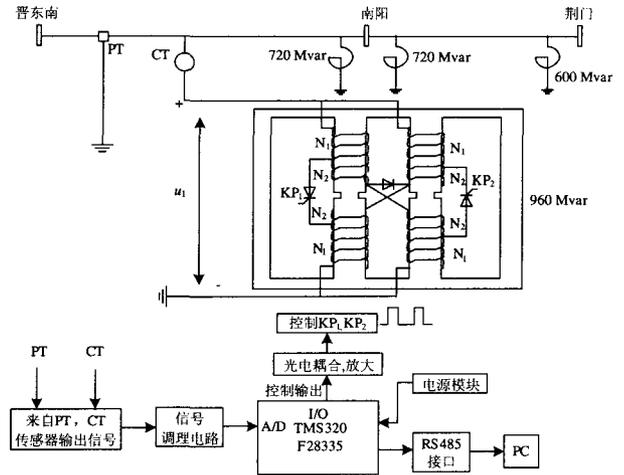


图1 DSP控制特高压磁阀式可控电抗器的结构图

Fig.1 Structure of magnetic valve controllable reactor of UHV

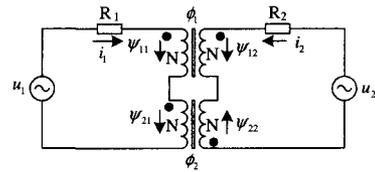


图2 磁阀式可控电抗器的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of magnetic-valve controllable reactor

图2中四个线圈的匝数都分别为 N , 2个铁芯中磁通分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 ; 四个线圈的磁链分别为 ψ_{11} 、 ψ_{12} 、 ψ_{21} 、 ψ_{22} , 其中 $\psi_{11} = \psi_{12} = \psi_1 = N\phi_1$, $\psi_{21} = \psi_{22} = \psi_2 = N\phi_2$ 。图中所有的变量都采用标么值,电阻 R_2 等效为 $R_2 = \frac{1+m^2\delta}{1-m^2\delta}R_1$ 。式中 δ 是自耦比 $\delta \ll 1$, m 是晶闸管导通区间集合为 $m = [-1, 0, 1]$ 与导通角相关,则MVCR的数学模型为

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_{11}}{dt} + \frac{d\psi_{21}}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_{12}}{dt} - \frac{d\psi_{22}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_1 为电网电压, u_2 为控制电压。

$$\begin{cases} L_{11}(i_1, i_2, u_2) = \frac{\partial \psi_1}{\partial i_1} & L_{21}(i_1, i_2, u_2) = \frac{\partial \psi_1}{\partial i_2} \\ L_{12}(i_1, i_2, u_2) = \frac{\partial \psi_2}{\partial i_1} & L_{22}(i_1, i_2, u_2) = \frac{\partial \psi_2}{\partial i_2} \end{cases} \quad (2)$$

MVCR的磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_1 = L_{11}(i_1, i_2, u_2)i_1 + L_{12}(i_1, i_2, u_2)i_2 \\ \psi_2 = L_{21}(i_1, i_2, u_2)i_1 - L_{22}(i_1, i_2, u_2)i_2 \end{cases} \quad (3)$$

从公式(1)、(2)、(3)分析得出该电抗器具有强耦合非线性特点。

文献[4]指出MVCR在工作区域内具有近似线性的控制特性曲线与伏安特性曲线。经过分析计算,特高压MVCR的电压控制状态可变电感特性曲线近似如图3所示。

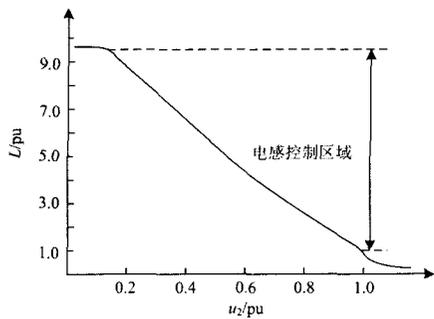


图3 MVCR的电感与控制电压 u_2 曲线图

Fig.3 Curve of inductance and control voltage

u_2 of MVCR

在图3中,电感存在一定的可控制区域,在额定电感值时, MVCR的额定容量值为最大。在可控制区域之外,存在着电感控制死区和电感过饱和区域。

根据公式(1)~(3)构造的MVCR模型,采用常规的PID控制策略难以达到理想的控制,在此提出采用自抗扰控制器来构造该系统的控制算法。

2 可控电抗器自抗扰控制原理

自抗扰控制器(ADRC)是由中国科学院韩京清研究员经过十多年的研究由线性系统控制器到非线性系统控制器逐步完善形成的非线性控制结构^[9]。其结构如图4所示,在图中 y 为公式(1)中的电压 u_1 , u 为控制电压 u_2 , v 为电压的给定值 u_1^* , 扰动 w 为电流 i_1 。二阶的ADRC由跟踪微分器TD、扩张状态观测器ESO和非线性状态误差反馈控制律NLSEF三部分组成。

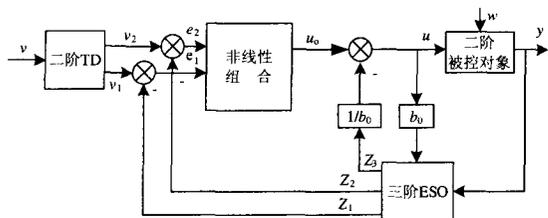


图4 ADRC的结构图

Fig.4 Structure of ADRC

ADRC在反馈中通道用扩张状态观测器代替跟踪微分器, 在非线状态误差反馈中用能估计模型内扰和外扰总和作用的扩张状态来代替积分环节。ADRC中不用积分调节, 也能达到消除系统静差的要求, 却没有积分所带来的负面影响。该控制系统选用二阶的ADRC, 其控制算法如下:

$$\text{TD} \begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + T v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + T f_{st}(v_1(k) - v_0(k), v_2(k), r, h) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{ESO} \begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + T[z_2(k) - \beta_{01}e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + T[z_3(k) - \beta_{02}fal(e(k), 0.5, \delta) + b_0u(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) - T\beta_{03}fal(e(k), 0.25, \delta) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{NLSEF} \begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_1 fal(e_1, a_1, \delta_1) + \beta_2 fal(e_2, a_2, \delta_1) \\ u = u_0 - z_3 / b_0 \end{cases} \quad (6)$$

公式(4)为TD的方程, 其中: $f_{st}(x)$ 为非线性方程。

$$d = r \cdot h, d_0 = dh, y = v_1 - v_0 + hv_2; \quad a_0 = \sqrt{d_2 + 8r|y|},$$

$$a = \begin{cases} v_2 + y/h & |y| \leq d_0 \\ v_2 + 0.5(a_0 - d) \text{sign}(y) & |y| > d_0 \end{cases}$$

$$f_{st} = \begin{cases} -ra/d & |a| \leq d_0 \\ -r \text{sign}(a) & |a| > d_0 \end{cases}$$

公式(5)为ESO的方程,其中: $e(k) = z_1(k) - y(k)$ 。

公式(6)为NLSEF的方程, 式中:

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} e \cdot \delta^{a-1} & |e| \leq \delta \\ |e|^a \text{sign}(e) & |e| > \delta \end{cases}$$

而对于建立基于自抗扰控制器的 MVCR 半实物仿真装置存在的一个关键步骤是需要 TI F28335 DSP 数字信号处理器中, 建立表 1 所列出的特征参数的数据存储器空间, 来进行整个半实物仿真系统的实时仿真和控制^[12,13]。

3 MVCR的ADRC控制仿真与分析

应用Matlab2008A和TMS320F28335, 构成了特高压交流输电系统和MVCR模型半实物仿真装置, 一般的DSP系统都可以实现传统的PID实时控制算法, 但实现智能的控制算法资源上存在着很大的不足。该装置由于采用了TI公司最新推出的高速浮点控制专用的TMS320F28335, 其最大特点是采用较为复杂的自抗扰控制器进行实时控制。该半实物仿真装置是采用 Matlab2008A 的电力工具箱

(SimPowerSystems)来建立特高压交流输电系统,并根据MVCR模型,同时采用Simulink7.0中的TI C2000系列DSP实时开发工具箱(Target for TI C2000)对于TMS320F28335系统进行在线编程和算法实时

运算评估^[14]。半实物仿真系统通过RS232或RS485接口和CCS V3.3软件与寄主上位计算机实现数据高速通讯,TMS320F28335系统与系统仿真模型自动交换数据。

表 1 自抗扰控制器的特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of ADRC

r	h	t	β_{01}	β_{02}	β_{03}	β_1	β_2	a_1	a_2	δ_1	b_0
10	0.01	0.000 1	100	66	93	99	9.6	0.75	1.25	0	1.0

MVCR 采用主控分离式结构,控制电压采用更低的电压等级,以提高运行的可靠性。表 2 为特高

压 MVCR 半实物仿真装置相关参数,其中电网有功潮流为 3 000 MkW。

表2 MVCR半实物仿真装置相关参数

Tab.2 MVCR correlation parameter of hardware-in-the-loop simulation device

额定电网电压 /kV	额定控制电压 /kV	MVCR每相额定容量 /Mvar	额定频率 /Hz	电网侧额定电 感值/H	MVCR额定电 阻值/ Ω
$1\ 000/\sqrt{3}$	$110/\sqrt{3}$	960/3	50	3.3	5.2
$1\ 000/\sqrt{3}$	$110/\sqrt{3}$	720/3 (2套)	50	4.4	6.9
$1\ 000/\sqrt{3}$	$110/\sqrt{3}$	600/3	50	5.3	8.3

根据表 2 的有关参数和公式 (1) ~ (3) 建立了特高压电网系统和 MVCR 装置的主电路动态仿

真模型。

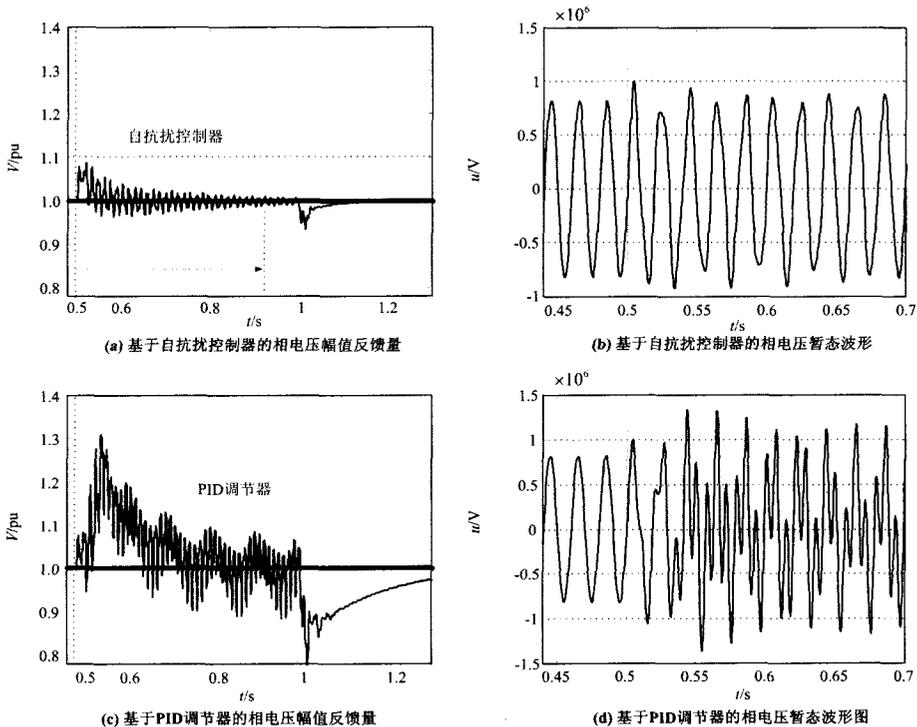


图 5 TMS320F28335 半实物相电压仿真结果图

Fig.5 Simulation result diagram of TMS320F28335 phase voltage

采用了 Matlab2008A 和 TMS320F28335 系统,构成了特高压交流输电系统和 MVCR 模型半实物仿

真装置,该装置的最大特点是采用 TMS320F28335 系统实现 ADRC 的实时控制,通过半实物仿真装置

试验得出以下结果:

1) 采用 ADRC 可实现 MVCR 的强耦合、非线性模型控制以及在特高压交流输电系统的应用。半实物仿真试验表明,该控制策略鲁棒特性好,在系统拓扑结构突变后,仍然可以保持良好的控制性能,优于传统的 PID 控制策略。

从图 5(a)可以分析出采用 ADRC 后,在无故障甩负荷情况下,ADRC 的输入相电压反馈量,经滤波后的幅值 $\sigma_1 < 10\%$,其调节时间 $t_s < 0.45$ s;而采用 PID 调节器时,其滤波后的输入相电压反馈量的幅值的 σ_2 高于 30%,其调节时间 $t_s > 0.5$ s。

2) MVCR 模型在不同的电网有功潮流和输电功率的状态下,可以连续动态实现系统的无功平衡。图 5(b)和 5(d)表明,当时间 $t < 0.5$ s 时,特高压交流输电系统的有功潮流为 3 000 MW。MVCR 采用自抗扰控制器和 PID 控制器均可以实现系统的无功平衡,从而保持送端、受端和落地点的电网电压恒定。但是,这两种调节器控制 MVCR 的动态性能的能力却有很大的差异。

3) ADRC 在特高压输电系统出现工频暂态过电压时,可以实现电压的快速、无级闭环控制。例如,在断路器突然断开,甩掉全部重载负荷的极端条件下,ADRC 可以实现电压的稳压控制,有效地抑制工频暂态过电压。在系统重合闸以后,可以快速地恢复电压稳定。从图 5(a)中可以分析出,在系统保护甩负荷时,如采用 ADRC 控制 MVCR,其相电压的峰值电压从额定峰值 816.5 kV,最高上升到 1 000 kV,即其工频暂态过电压标么值由 1.0 pu 上升到 1.22 pu。而采用 PID 调节器时,其相电压的峰值电压从额定峰值 816.5 kV,最高上升到 1 334 kV,即其工频暂态过电压标么值由 1.0 pu 上升到 1.67 pu。

ADRC 利用非线性结构从根本上克服了经典 PID 所固有的缺陷,能有效解决控制对象的模型不确定性,多扰动和时滞等问题,其基本思想和方法与传统控制器相比有很大的突破。应用在特高压交流输电系统和磁阀式可控电抗器具有十分显著的优点。

4 结论

随着对于特高压电力系统无功功率平衡问题深入的研究。MVCR 在无功补偿等方面有着巨大的应用前景。文中在分析 MVCR 特点及使用现状的基础上,建立了 ADRC 在特高压无功补偿控制系统应用。采用 Matlab2008A、TMS320F28335 及 ADRC 构成的半实物仿真系统,在快速性和稳定性等方面,ADRC 优于常规的 PID。其系统可以很好地构造实

时控制算法,以满足提高特高压交流输电功率、实现无功平衡,提高系统稳定性和供电质量,采用 F28335 高速浮点 DSP 的 ADRC 可以适应 MVCR 复杂非线性的高速运算控制特点,满足特高压线路中的无功功率快速响应要求。理论分析得到了在不同负载特性和甩掉重负载的全补偿条件下,特高压 MVCR 的控制规律,并构造出 F28335 高速浮点 DSP 的离散算法。其半实物仿真结果表明,在系统保护甩负荷时,如采用 ADRC 控制 MVCR,其相电压的峰值电压从额定峰值 816.5 kV,最高上升到 1 000 kV,即其对应的工频暂态过电压标么值由 1.0 pu 仅仅上升到 1.22 pu,其预测结果优于我国特高压输电系统的工频过电压设计指标,即工频过电压在变电站侧不超过 1.3 倍,在线路侧不超过 1.4 倍;其试验结果也为该装置工程设计提供了理论基础。

参考文献

- [1] 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 Qin-yong, GUO Qiang, BU Guang-quan, 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.
- [2] 舒印彪.1000kV交流特高压输电技术的研究与应用[J].电网技术,2005,29(19):1-6. SHU Yin-biao. Research and Application for 1000kV AC UHV Transmission[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 1-6.
- [3] 舒印彪.我国特高压输电的发展与实施[J].中国电力,2005,38(11):1-8. SHU Yin-biao. Development and Execution of UHV Power Transmission in China[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 1-8.
- [4] 赵志强,李众祥,张喜乐.磁阀式可控并联电抗器模型试验研究[J].电力自动化设备,2007,27(1):68-70. ZHAO Zhi-qiang, LI Zhong-xiang, ZHANG Xi-le. Test of Magnetic Valve Controllable Parallel Reactor Model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1): 68-70.
- [5] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [6] 谷定燮,周沛洪.特高压输电系统过电压、潜供电流和无功补偿[J].高电压技术,2005, 31(11):21-25. GU Ding-xie, ZHOU Pei-hong. Over-voltage, Secondary Arc and Reactive Power Compensation in UHV AC Transmission System[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 21-25.
- [7] 张文亮,周孝信,郭剑波,等. ±1000 kV 特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J].中国电机工程学报,2007,27(28):1-5.

(下转第 54 页 continued on page 54)

kV 及以下电压等级的母线保护, 逻辑信号采用 IEC61850 为标准的 GOOSE 信息。本方法已经成功在河南金谷园 110 kV 变电站改造工程中应用。

参考文献

[1] 梁晓亮, 王波, 张勇. 几起 10LV 母线故障分析及其保护装置的研发和应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17):97-99.

[2] 李韶涛, 常胜. 高压变电站 10 kV 母线保护的分析和研究[J]. 继电器, 2003, 31(8):30-32.
LI Shao-tao, CHANG Sheng. Analysis and Study on 10 kV Busbar Protection of HV Substation[J]. Relay, 2003, 31(8):30-32.

[3] IEC61850-7-2:2003.IDT 变电站通信网络和系统 第 7-2 部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构 抽象通信服务接口 (ACSI) [S].
IEC 61850-7-2:2003. IDT Communication Networks and Systems in Substations Part7-2:Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment Abstract Communication Service Interfaces[S].

[4] IEC61850-9-1:2003.IDT 变电站通信网络和系统 第 9-1 部分: 特定通信服务映射 (SCSM) 通过单向多路点对点串行通信链路的采样值[S].
IEC 61850-9-1:2003. IDT Communication Networks and Systems in Substations Part9-1:Specific Communication

Service Mapping(SCSM) Sampled Values over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link[S].

[5] IEC61850-9-2:2003.IDT 变电站通信网络和系统 第 9-2 部分: 特定通信服务映射 (SCSM) 通过 ISO/IEC8802-3 的采样值[S].
IEC 61850-9-1:2003. IDT Communication Networks and Systems in Substations Part9-2:Specific Communication Service Mapping(SCSM) Sampled Values over ISO/IEC 8802-3 Link[S].

[6] 宋小舟, 余锐, 操丰梅, 等. 基于 IEC61850 功能分层的母线保护方案研究[J]. 电网技术, 2006, 30 (S) :229-332 .
SONG Xiao-zhou, YU Rui, CAO Feng-mei, et al. A Scheme of Bus Protection in Substation Communication Network and System IEC61850[J]. Power System Technology, 2006, 30 (S) :229-332.

收稿日期: 2008-09-04

作者简介:

王锐 (1957-), 女, 高级工程师, 长期从事继电保护技术研究与管理工作; E-mail:hndlwr@tom.com

王政涛 (1962-), 男, 高级工程师, 长期从事电力技术继电保护研究与技术管理工作;

李海星 (1963-), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统变电技术管理工作。

(上接第 50 页 continued from page 50)

ZHANG Wen-liang, ZHOU Xiao-xin, GUO Jian-bo, et al. Feasibility of ± 1000 kV Ultra HVDC in the Power Grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8):1-5(in Chinese).

[8] 陈维贤, 陈禾, 鲁铁成. 关于特高压可控并联电抗器[J]. 高电压技术, 2005, 31(11):26-27.
CHEN Wei-xian, CHEN He, LU Tie-cheng. Ultra-high Voltage Controllable Shunt Reactor[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11):26-27.

[9] SU Jian-bo, QIU Wen-bin, MA Hong-yu, et al. Calibrationfree Robotic Eye-hand Coordination Based on an Auto Disturbance-rejection Controller[J]. IEEE Trans Robotics, 2004, 20(5):899-907.

[10] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1):19-23.
HAN Jing-qing. Auto-disturbances-rejection Controller and Its Applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1):19-23.

[11] 屠黎明, 苏毅, 于坤山. 微机可控高压并联电抗器保护的研制[J]. 电力系统及其自动化, 2007, 31(24):94-99.
TU Li-ming, SU Yi, YU Kun-shan. Development of Microcomputer Protection for a Controllable High Voltage Shunt Reactor[J]. Automation of Electric Power

Systems, 2007, 31(24):94-99.

[12] 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.

LI Da-yi, CHEN Qiao-fu, JIA Zheng-chun. A Novel Principle of Adjustable Reactor Based on Magnetic Flux Controllable[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 116-120.

[13] FENG Gui-hong, WANG Feng-xiang, ZHANG Bing-yi. Modeling and Characteristics of a Novel Magnet Saturation Controllable Reactor[A]. in: The Fifth International Conference[C]. 2003.313-315.

[14] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.353-360.

收稿日期: 2008-09-02; 修回日期: 2008-12-10

作者简介:

王晓雷 (1963-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机电器与电力电子;

吴必瑞 (1982-), 男, 硕士, 助教, 研究方向为电气自动控制系统; E-mail:waterok007@yahoo.com.cn

毋炳鑫 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气自动控制系统。