

基于自抗扰控制技术的 VSC-HVDC 系统控制器设计

范彬¹, 王奔¹, 李新宇²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 廊坊职业技术学院 电气工程系, 河北 廊坊 065000)

摘要: 简要概述基于电压源型换流器的轻型直流输电(VSC-HVDC)系统的工作原理, 建立在同步旋转坐标系下的暂态数学模型。采用自抗扰控制(ADRC)方法设计送端系统和受端系统外环电压、功率控制器, 以产生内环电流参考值。送端系统外环采用最优控制函数(Fal 函数), 内环采用一阶自抗扰控制器来跟踪参考电流; 受端系统外环采用一阶自抗扰控制器, 内环采用 Fal 函数来跟踪参考电流。采用以上控制策略实现系统模型的完全解耦并实现有功功率、无功功率独立控制的目的。利用 MATLAB/Simulink 对所设计的控制器进行数字仿真, 仿真结果显示: 对于交直流系统电压变化、有功功率及无功功率阶跃的情况, 系统均能实现快速的动态响应, 达到满意的控制性能指标。

关键词: 电压源型换流器; 高压直流输电; 自抗扰控制; Fal 函数; 扩张状态观测器

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.012

0 引言

基于电压源型换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)因其具有高度的灵活性与可控性而成为电力科研的一个热门方向。国内外许多学者对这种轻型直流输电系统的数学模型及控制策略进行了深入研究。文献[1-7]建立了直流输电系统基于同步旋转坐标系下的稳态及暂态数学模型, 并用反馈线性化理论、变结构控制理论、鲁棒控制理论、李雅普诺夫稳定性理论、逆系统等多种控制方法设计了换流站控制器。文献[8]设计出一种基于瞬时对称分量法的序分量检测技术, 并提出在三相不平衡电力系统的控制中增加不平衡指令补偿模块, 改善了 VSC-HVDC 在电网三相不平衡时的运行特性。由于 VSC-HVDC 精确数学模型本身的复杂性, 本文将自抗扰控制(ADRC)技术引入 VSC-HVDC 中, 避免了控制系统对复杂数学模型的过度依赖, 具有很强的鲁棒性。

ADRC 理论是 20 世纪 90 年代提出的一种控制策略。该方法吸收了现代控制的理论成果, 继承并发扬了 PID 思想的精髓, 融合了变结构控制的理念, 却又消除了 PID、变结构控制所固有的一些缺点。ADRC 技术已经在航空、航天、电力、化工等领域得到应用。这种控制方法对受控对象的数学模型依赖性

不强, 具有响应快速、控制精度高和鲁棒性强的优点。文献[9]将 ADRC 引入到基于电流源型 HVDC 系统的控制中, 较好地解决了 HVDC 模型不确定性的问题及扰动难以精确估计的问题。文献 [10]将 ADRC 技术引入到三相电压型整流器中, 并采用优化的一阶自抗扰控制器进行控制, 试验结果证明了一阶自抗扰控制器在三相 PWM 整流器中具有优良的控制性能及良好的鲁棒性。

本文在简要介绍 VSC-HVDC 工作原理的基础上, 建立了基于同步旋转坐标系下的模型。为实现双端有功功率、无功功率的独立解耦控制, 利用 ADRC 方法设计了应用于 VSC-HVDC 系统的内、外双环控制器。最后利用 MATLAB/Simulink 软件验证了所设计的自抗扰控制器的优越性。

1 VSC-HVDC 的工作原理及旋转坐标系下的数学模型

图 1 为双端 VSC-HVDC 输电系统结构图, 该系统两端采用相同结构的 VSC。

以 VSC1 系统为例, 忽略交流侧等效电阻 R_1 的损耗和谐波分量后, 换流器吸收的有功功率和无功功率为:

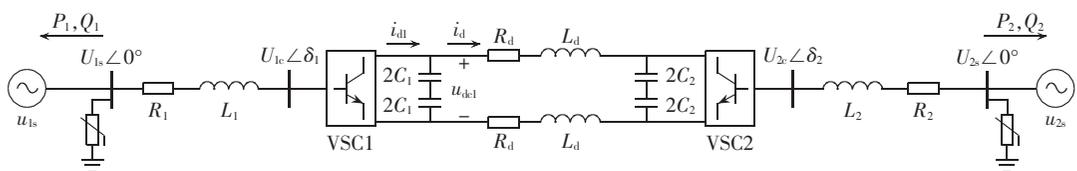


图 1 双端 VSC-HVDC 输电系统

Fig.1 Dual-terminal VSC-HVDC transmission system

$$\begin{cases} P_1 = U_{1s} U_{1c} \sin(\delta_1 / X_1) \\ Q_1 = U_{1s} (U_{1s} - U_{1c} \cos \delta_1) / X_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_{1s} 、 U_{1c} 、 δ_1 分别为交流母线电压、换流器交流电压基波分量和二者相角差; X_1 为换流变压器等效电抗。

通过控制 U_{1c} 和 δ_1 的大小就可控制换流器吸收的有功功率和无功功率的大小和流动方向。

设三相电网电压平衡, 根据图 1 所示参考方向, 对三相交流系统进行 dq 变换。假定交流系统母线电压 a 相与旋转坐标系下的 d 轴重合, 则直、交轴电压分量分别为 $u_{isd} = U_{1s}$ 、 $u_{isq} = 0$ 。系统在 dq 坐标系下的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \dot{i}_{1d} = (-R_1 i_{1d} + \omega L_1 i_{1q} + U_{1s} - u_{1cd}) / L_1 \\ \dot{i}_{1q} = (-\omega L_1 i_{1d} - R_1 i_{1q} - u_{1cq}) / L_1 \\ u_{dk1} = (i_{d1} - i_d) / C_1 \\ \dot{i}_{2d} = (-R_2 i_{2d} + \omega L_2 i_{2q} - U_{2s} + u_{2cd}) / L_2 \\ \dot{i}_{2q} = (-\omega L_2 i_{2d} - R_2 i_{2q} + u_{2cq}) / L_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, i_{d1} 、 i_d 分别为换流器输出端直流电流及直流线路电流; u_{isd} 、 u_{isq} 分别为 u_{isabc} 变换后对应的 d 、 q 轴分量; u_{icd} 、 u_{icq} 为 VSC 交流侧电压基波的 d 、 q 轴分量; i_{id} 、 i_{iq} 为 VSC 交流侧电流 d 、 q 轴分量; 下标 $i=1, 2$ 分别代表 VSC1 和 VSC2 侧。

2 自抗扰控制器设计

2.1 自抗扰控制器算法

自抗扰控制器是一种基于误差反馈的新型控制方法, 对受控对象数学模型的依赖性低, 结构和算法简单, 且响应速度快, 控制精度高。本文所建立的一阶自抗扰控制器主要由两部分构成: 非线性状态反馈控制器 (NLSEF) 和扩张状态观测器 (ESO)。ESO 通过输入的运算可以实时估计系统内、外部干扰以及由于模型不确定所引起的扰动, 并对其补偿。NLSEF 环节为误差反馈环节。通过优化后的控制器即为一阶自抗扰控制器, 其控制原理如图 2 所示。图 2 中, v_{ref} 为被控输出量参考值, v 为被控输出量; z_1 为输出 v 的跟踪信号; z_2 为扰动观测值; u 为控制量; b 为补偿因子。

简化后的一阶自抗扰控制器的算法如下。

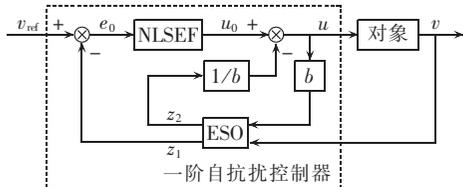


图 2 一阶自抗扰控制器原理图

Fig.2 Schematic diagram of first-order ADRC

2.1.1 ESO

ESO 是一个动态系统, 其输入为被控对象的输入-输出信息, 对受干扰的系统进行自动补偿, 从而实现精确跟踪参考值, 最终达到预期目标。

$$\begin{cases} e = z_1 - v \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e + b u \\ \dot{z}_2 = \beta_2 \text{Fal}(e, \alpha, \delta) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e) & |e| > \delta \\ e / \delta^{1-\alpha} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (4)$$

其中, β_1 、 β_2 为输出误差校正系数, 选择合适的值即可实现很好的状态估计; $\text{Fal}(e, \alpha, \delta)$ 为最优控制函数, 是 ESO 控制的核心部分, 且具有滤波功能^[11-12]; δ 为滤波因子; α 为非线性因子, 其值对系统的低频振荡有影响, 甚至可以起到消除振荡的作用。

2.1.2 NLSEF

一阶自抗扰控制器中的非线性 NLSEF 采用比例环节控制。

$$\begin{cases} e_0 = v_{ref} - z_1 \\ u_0 = k e_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, k 为反馈控制率的比例系数, 可影响系统电压及功率跟踪参考值的逼近程度。

2.2 送端系统控制器设计

在正常工作情况下, 以 VSC1 为送端系统。为了达到良好的控制性能, 采用内、外环形式的双环控制。送端系统担负平衡系统有功功率及稳定直流系统电压的重要作用, 本文对送端系统利用定直流电压、定无功功率控制的控制策略。

忽略换流站自身损耗时, 计及控制目标要求, 有:

$$\frac{3}{2} (U_{1s} i_{1d} - R_1 i_{1d}^2) = \left(C \frac{du_{dk1}}{dt} + i_d \right) u_{dk1} \quad (6)$$

故得:

$$\frac{du_{dk1}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{U_{1s} - R_1 i_{1d}}{C u_{dk1}} i_{1d} - \frac{i_d}{C} \quad (7)$$

上式中 u_{dk1} 和 i_d 可方便测量。为实现控制算法简单、高速的目标, 对直流电压外环控制器采用最优控制函数 Fal 实现被控对象的跟踪控制^[10,13-14]。可得:

$$i_{1dref} = k_1 \text{Fal}(u_{dk1ref} - u_{dk1}, \alpha, \delta) - f_1 / b_1 = k_1 \text{Fal}(u_{dk1ref} - u_{dk1}, \alpha, \delta) + \frac{2u_{dk1} i_{1d}}{3(U_{1s} - R_1 i_{1d})} \quad (8)$$

测量 i_{1d} 、 i_{1q} 并输入到自抗扰控制器中, 得到内环控制量的变化量 Δu_{1cd} 、 Δu_{1cq} , 结合三相交流系统的 u_{1cd} 、 u_{1cq} 得到 u_{1cdref} 、 u_{1cqref} 。定直流电压、定无功功率控制器控制框图如图 3 所示。

系统正常运行时, 控制目标是直流侧电压稳定、交流侧系统单位功率因数运行。为了实现送端系统单位功率因数运行, 即零无功功率输出, 在旋转坐标

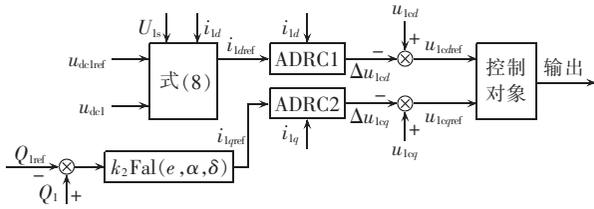


图 3 定直流电压、定无功功率控制器

Fig.3 Constant DC voltage and constant reactive power controller

系统中,根据所选择的相位参考值可知,无功功率仅与 i_{lq} 有关,所以控制目标即是使得 i_{lq} 快速、稳定地跟踪 i_{lqref} 。

2.3 受端系统控制器设计

正常工作情况下,VSC2 为受端系统,直流系统传输功率由 VSC2 侧所带负荷决定。本文对受端系统采用定有功功率、定无功功率控制,整个控制器由内环电流控制器和外环功率控制器组成。

按照 VSC2 系统所选坐标, $u_{2sd} = U_{2s}, u_{2sq} = 0$ 。旋转坐标系下受端系统的有功功率和无功功率表达式如下:

$$\begin{cases} P_2 = \frac{3}{2} U_{2s} i_{2d} \\ Q_2 = -\frac{3}{2} U_{2s} i_{2q} \end{cases} \quad (9)$$

系统稳定运行时, U_{2s} 基本恒定。考虑系统静态误差的影响,将有功功率、无功功率及各自偏差值输入一阶自抗扰控制器中,得到电流 i_{2d}, i_{2q} 的修正量,并和依据式(9)计算得到的输出预估值进行相加后,作为有功功率、无功功率电流参考值 i_{2dref}, i_{2qref} ,即:

$$\begin{cases} i_{2dref} = \Delta i_{2d} + i_{2d} = k_3 \text{Fal}(P_{2ref} - P_2, \alpha, \delta) + \frac{2P_{2ref}}{3U_{2s}} \\ i_{2qref} = \Delta i_{2q} + i_{2q} = k_4 \text{Fal}(Q_{2ref} - Q_2, \alpha, \delta) - \frac{2Q_{2ref}}{3U_{2s}} \end{cases} \quad (10)$$

为实现跟踪的快速性,实时测量 $i_{2d}, i_{2q}, u_{2cd}, u_{2cq}$ 的值,并结合式(10),采用最优控制函数 Fal 函数来确定 u_{2cdref} 和 u_{2cqref} ,可得到内环控制器参考电压:

$$\begin{cases} u_{2cdref} = \Delta u_{2cd} + u_{2cd} = u_{2cd} + k_5 \text{Fal}(i_{2dref} - i_{2d}, \alpha, \delta) \\ u_{2cqref} = \Delta u_{2cq} + u_{2cq} = u_{2cq} - k_6 \text{Fal}(i_{2qref} - i_{2q}, \alpha, \delta) \end{cases} \quad (11)$$

定有功功率、定无功功率控制原理如图 4 所示。

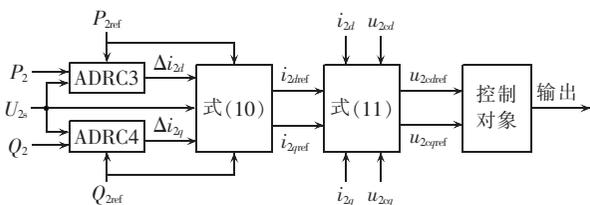


图 4 定有功功率、定无功功率控制器

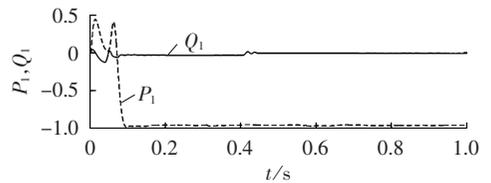
Fig.4 Constant power and constant reactive power controller

3 仿真分析

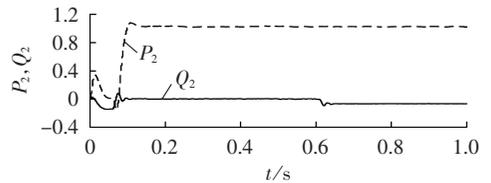
为了验证所建模型和控制器正确性和有效性,本文在 MATLAB/Simulink 中搭建了图 1 所示的 VSC-HVDC 系统仿真模型,仿真系统采用标幺制。电路参数为:两端交流系统采用发电机-变压器单元接线方式,变压器出线端电压额定值为 110 kV,系统功率基准值为 200 MW, $R_1 = R_2 = 0.15 \Omega, L_1 = L_2 = 3.5 \text{ mH}$;直流侧输电线路等效电阻和电感为 $R_d = 0.2 \Omega, L_d = 10 \text{ mH}, C_1 = C_2 = 160 \mu\text{F}$,直流侧电压参考值为 100 kV。控制器参数: $\alpha = 0.5, \delta = 0.01, k_1 = 0.5, k_2 = 6.3, k_3 = 0.6, k_4 = 5.5, k_5 = 0.6, k_6 = 0.5$;ADRC1 中, $\beta_1 = 25, \beta_2 = 40, b = 3$;ADRC2 中, $\beta_1 = 18, \beta_2 = 43.5, b = 3.6$;ADRC3 中, $\beta_1 = 15, \beta_2 = 40, b = 1$;ADRC4 中, $\beta_1 = 18, \beta_2 = 41.6, b = 3$ 。结合文献[15-16]所述的参数选择方法,并考虑有功功率反转运行的要求,本文双端控制器对称布置。正常运行时,VSC1 为送端系统,工作于整流状态,采用定直流电压、定无功功率控制;VSC2 为受端系统,工作于逆变状态,采用定有功功率、定无功功率控制。功率反转时,VSC1 与 VSC2 功能互换,控制方法亦满足送端定直流电压、定无功功率控制,受端定有功功率、定无功功率控制。

3.1 系统电压及无功功率阶跃响应

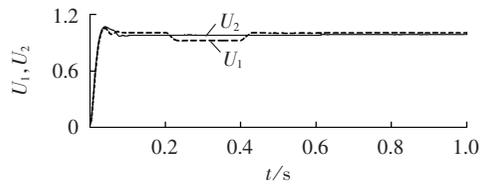
取上述参数,0~0.1 s 为启动阶段;0.2~0.4 s 送端系统交流电压参考值为 0.9;送端系统无功功率在 0.4 s 时由 -0.1 变为 0;受端系统无功功率在 0.6 s 时由 0 阶跃至 -0.1。图 5 分别为送、受端系统有功功率及无功功率阶跃响应和电压响应。



(a) 送端系统有功功率与无功功率波形



(b) 受端系统有功功率与无功功率波形



(c) 送、受端系统交流侧电压波形

图 5 系统电压及有功、无功功率阶跃响应
Fig.5 Step response to system voltage and active/reactive power

从图 5 可以看出,在 0.2~0.4 s 送端系统交流电压变化时对受端系统电压及两端有功功率、无功功率的输送均无影响;在 0.4 s 送端系统无功功率变化时,该端电压及有功功率可以稳定在参考值。在 0.6 s 时受端系统无功功率发生阶跃,该端电压及有功功率亦能稳定在参考值。送端系统或受端系统无功功率发生变化时,对另一端有功功率、无功功率和电压几乎无影响,说明送、受端系统控制的独立性。

3.2 有功功率阶跃响应

在 0~0.7 s 时,VSC1 为送端系统;0.7 s 时由整流工作状态转变成逆变工作状态,所带负载为 1。VSC2 在 0.7 s 时由逆变转为整流;0~0.3 s 时,需要有功功率为 1;0.3 s 时有功功率减少至 0.6;0.7 s 之后转为整流状态,所发出的有功功率依据 VSC1 此时的功率需求决定。图 6 为系统有功功率阶跃响应。

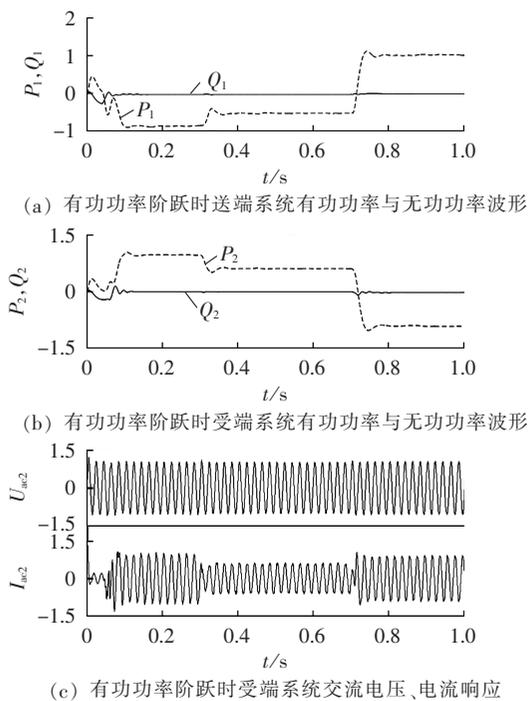


图 6 系统有功功率阶跃时响应

Fig.6 Response to step change of system active power

从图 6 可以看出:在 0.3 s 时,VSC2 有功功率发生变化,送端系统能根据受端系统有功功率的需求而发出有功功率,此时系统两端无功功率均不受影响,而交流系统电流则由变化前的 1 减小至 0.6;在 0.7 s 时,有功功率发生反转,系统两端的无功功率微小波动,这是在换流器工作状态发生突变时的正常现象;而受端系统的交流侧电流不但幅值增大,而且相位角也与变化前有所不同,原因在于换流器无功功率需求的变化。

3.3 直流电压阶跃响应及受端内环电流跟踪响应

0~0.1 s 系统启动;0.8 s 时送端系统直流输出电压参考值由 1 阶跃至 0.9。图 7 为定直流侧直流电压

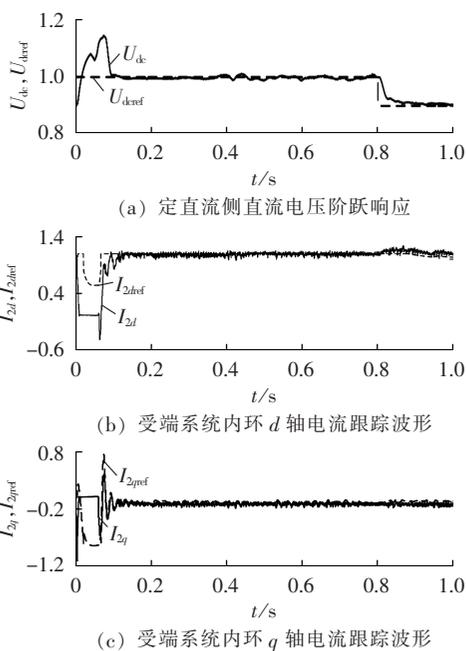


图 7 定直流侧直流电压阶跃及受端内环电流跟踪响应

Fig.7 Response of inner loop current tracking to step change of DC voltage

阶跃及受端内环电流跟踪响应。

由图 7 可以看出,当系统直流输出电压在 10% 内发生变化时,采用 ADRC 设计的控制器可以很好地跟踪参考电压值。对于内环电流而言,实测值基本能够跟踪参考值的变化。

3.4 三相短路故障

在 0.6~0.7 s 时间内,受端系统发生三相短路故障。图 8 为受端系统发生三相短路故障时送端系统交流电流及受端系统有功功率、无功功率响应。

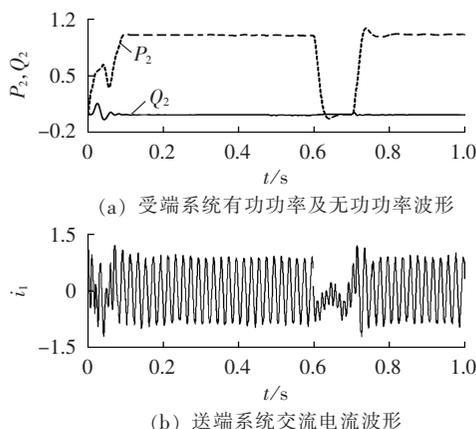


图 8 受端系统三相短路响应

Fig.8 Response to three-phase short circuit of receiving terminal

由图 8 可以看出,在受端系统发生三相短路故障时,该端系统无功功率为零,但有功功率在故障结束后有波动现象;而送端系统交流电流在故障消除之前会很小,仅提供维持送端系统所需少量功率。

4 结论

本文建立双端VSC-HVDC输电系统在 dq 坐标系下的非线性暂态数学模型。利用ADRC技术设计了双环控制器,控制方法简单,易于实现,无需复杂的数学计算,控制器对被控系统参数不敏感,实现双端有功功率、无功功率的完全解耦;当有功功率阶跃、直流侧电压变化及交流系统发生三相短路时,控制器亦能实现系统稳定运行。由MATLAB/Simulink的仿真结果可知,自抗扰控制器能够很好地满足控制要求,且对系统的模型依赖性低,有很强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 张桂斌,徐政,王广柱. 基于VSC的直流输电系统的稳态模型及非线性控制[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):17-22.
ZHANG Guibin, XU Zheng, WANG Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22.
- [2] 陈谦,唐国庆,胡铭. 采用 $dq0$ 坐标的VSC-HVDC稳态模型与控制器设计[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):61-66.
CHEN Qian, TANG Guoqing, HU Ming. Steady-state model and controller design of a VSC-HVDC converter based on $dq0$ -axis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 61-66.
- [3] 陈海荣,徐政. 基于同步旋转坐标变换的VSC-HVDC暂态模型及其控制器[J]. 电工技术学报,2007,22(2):121-126.
CHEN Hairong, XU Zheng. Transient model controller design for VSC-HVDC based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 121-126.
- [4] 黄崇鑫,张凯锋,戴先中,等. 含 LC 低通滤波器的VSC-HVDC系统的新型控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):12-17.
HUANG Chongxin, ZHANG Kaifeng, DAI Xianzhong, et al. Control strategy for VSC-HVDC system with LC low-pass filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 12-17.
- [5] 吴维鑫,王奔,李慧,等. 电压源换流器高压直流输电系统的精确线性化变结构控制器设计[J]. 电网技术,2011,35(7):161-166.
WU Weixin, WANG Ben, LI Hui, et al. Design of exact linearized variable-structure controller for VSC-HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 161-166.
- [6] RAMADAN H S, SIGUERDIDJANE H, PETIT M. A robust stabilizing nonlinear control design for VSC-HVDC system: a comparative study[C]//IEEE International Conference on Industry Technology. Gippsland, Australia: IEEE, 2009: 1-6.
- [7] LI Guangkai, ZHAO Chengyong, GENG Ying. Research of nonlinear control strategy for VSC-HVDC system based on Lyapunov stability theory[C]//Proceedings of Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: IEEE, 2008: 2187-2191.
- [8] 袁旭峰,高璐,文劲宇,等. VSC-HVDC三相不平衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):1-5.
YUAN Xufeng, GAO Lu, WEN Jinyu, et al. Unbalanced three-phase control strategy of VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 1-5.
- [9] 余涛,沈善德,李东海,等. 高压直流输电系统自抗扰控制方法[J]. 电力系统自动化,2002,26(22):22-26.
YU Tao, SHEN Shande, LI Donghai, et al. Study on auto-disturbance-rejection control for HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 22-26.
- [10] 刘子建,吴敏,王春生,等. 三相电压型PWM整流器自抗扰控制[J]. 信息与控制,2011,40(4):452-458.
LIU Zijian, WU Min, WANG Chunsheng, et al. Active disturbance rejection control of three-phase voltage source PWM rectifiers [J]. Information and Control, 2011, 40(4): 452-458.
- [11] 王宇航,姚郁,马克茂. Fal函数滤波器的分析及应用[J]. 电机与控制学报,2010,14(11):88-91.
WANG Yuhang, YAO Yu, MA Kemao. Analysis and application of Fal function filter[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(11): 88-91.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [13] 刘星桥,胡建群,周丽. 自抗扰控制器在三电机同步系统中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(12):80-85.
LIU Xingqiao, HU Jianqun, ZHOU Li. Active disturbance rejection control of three-motor synchronous control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 80-85.
- [14] 苏位峰,孙旭东,李发海. 基于自抗扰控制器的异步电机矢量控制[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(10):1329-1332.
SU Weifeng, SUN Xudong, LI Fahai. Vector control of induction motors with active disturbance rejection control [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2004, 44(10): 1329-1332.
- [15] 胡建群. 基于自抗扰控制技术的三电机同步控制系统研究[D]. 镇江:江苏大学,2010.
HU Jianqun. Study of three-motor synchronous control system based on active disturbances rejection control[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [16] 崔永山. 自抗扰控制器设计方法与应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
CUI Yongshan. The research of design method application of the active disturbances rejection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

作者简介:

范彬(1985-),男,安徽太和人,硕士研究生,研究方向为自抗扰控制技术在轻型高压直流输电及柔性交流输电系统中的应用(E-mail: binfan01@126.com);

王奔(1960-),男,湖南长沙人,教授,博士,研究方向为电力系统非线性变结构控制;

李新宇(1973-),女,河北廊坊人,讲师,研究方向为电力系统非线性控制。

(下转第75页 continued on page 75)

Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network

WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, ZHU Zhijun, JIANG Hongtao

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The fault characteristics of transient zero-sequence network are analyzed in detail, which demonstrates that, the energy spectrum of fault near phase-voltage peak is different from that of fault near zero-crossing point. Aiming at the inaccurate selection of faulty line of non-solid-earthed network when fault occurs near the zero-crossing point of phase voltage, a method of faulty line selection based on transient wavelet energy is proposed, which carries out the wavelet transform of transient zero-sequence current for each feeder, calculates the high- and low-frequency wavelet energies according to the wavelet coefficients, and selects the faulty line according to the maximum value of high- or low-frequency energy. Results of EMTP simulation show that, the proposed method is immune to the closing angle, fault distance, transition resistance, arc, system operating mode, etc., and the faulty line can be accurately and reliably selected when the single-phase grounding fault occurs with high resistance at the end of line or the fault occurs near the zero-crossing point of phase voltage.

Key words: non-solid-earthed network; single-phase grounding fault; faulty line selection; wavelet energy; EMTP; electric grounding; computer simulation

(上接第 69 页 continued from page 69)

Design of ADRC-based controller for VSC-HVDC system

FAN Bin¹, WANG Ben¹, LI Xinyu²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Department of Electrical Engineering, Langfang Polytechnic Institute, Langfang 065000, China)

Abstract: The operating principle of VSC-HVDC system is briefly discussed and its transient mathematical model is established in the synchronous rotating coordinates. The ADRC (Auto Disturbance Rejection Control) method is adopted in the design of outer loop voltage/power controller to generate the inner loop current references for rectifier and inverter. The Fal function is employed in the outer loop of sending terminal and the first-order ADRC is employed in its inner loop to track the current reference while the first-order ADRC in the outer loop of receiving terminal and the Fal function in its inner loop to track the current reference, which is applied to realize the complete decoupling of system model and the independent control of system active power and reactive power. The designed controller is simulated with MATLAB/Simulink and results show that, with satisfied control performance, system responds quickly to the variation of AC/DC system voltage and the step change of active/reactive power.

Key words: VSC; HVDC power transmission; auto disturbance rejection control; Fal function; extended state observer