

基于 PCHD 模型的 VSC - HVDC 系统的 L_2 增益控制

付永良, 王 奔, 陈新华, 邓大磊, 王吉庆
(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 基于轻型高压直流输电系统的端口受控哈密顿系统(PCHD)模型, 提出了一种针对基于电压源换流器的轻型高压直流(VSC - HVDC)输电系统的 L_2 增益控制新方法。首先根据 VSC - HVDC 的不同控制方式, 确定相应的 dq 坐标下的电流参考值。在此基础上, 根据控制目标和能量平衡的关系设计误差系统的能量存储函数, 通过 L_2 增益控制的方法设计控制器, 实现对参考电流的渐近追踪和对外界干扰的抑制。仿真结果验证了所提出的控制策略的正确性和有效性。

关键词: 高压直流输电; 电压源换流器; 哈密顿系统; 能量函数; L_2 增益控制

Abstract: Based on the port - controlled Hamilton with dissipation (PCHD) model , a new L_2 - gain repetitive control strategy of voltage sourced converter based high voltage direct current (VSC - HVDC) system is proposed. In the theory , the converter model of VSC - HVDC is equivalent to a dissipative passive system , and according to different control modes of VSC - HVDC , the reference currents in the corresponding dq - axis are determined. On the basis , L_2 - gain repetitive controller is designed to trace the reference currents and suppress the external disturbances. The simulation results verify the validity of the proposed control strategy.

Key words: high voltage direct current (HVDC) ; voltage sourced converter (VSC) ; port - controlled Hamilton system; energy function; L_2 gain control

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013)04 - 0050 - 05

随着可控关断型电力电子器件和 PWM 技术的发展, 基于电压源换流器的轻型高压直流(VSC - HVDC)输电系统越来越受到人们的关注。与传统的直流输电系统相比, 该输电系统可向无源网络供电、无换相失败风险、有功和无功功率可独立控制、并且易于构成多端直流系统等优点^[1]。

目前, VSC - HVDC 的控制策略包括采用控制交流侧电压和相位, 进而控制交流侧电流的间接电流控制策略^[2, 3]及直接电流控制策略^[4, 5], 但其内、外环采用两级 PI 来实现, 暂态性能不理想; 采用前馈解耦的方式实现系统电流快速跟踪和有功、无功功率独立调节的控制策略^[6], 但其外环建立在逆系统模型的基础上, 在大扰动情况下很难保持稳定; 采用状态反馈精确线性化理论, 来独立调节有功和无功功率的控制策略^[7], 其算法太过复杂。近年来, 基于无源理论的非线性控制成为电流跟踪控制的研究热点, 但参数的扰动以及外界干扰对其控制效果有很大的影响。

为抑制外界因素的影响, 下面将采用 L_2 增益控制的新方法^[8-9]。首先建立轻型高压直流输电系统

在旋转坐标系下的数学模型并写成端口受控的哈密顿形式^[11, 12], 通过控制目标与能量平衡的关系设置能量存储函数, 并根据 L_2 增益干扰抑制理论设计控制率, 从而实现交流侧电流的快速跟踪和直流侧电压恒定, 同时也实现了对外界干扰的抑制。最后通过 Matlab 仿真对所设计的控制器进行了验证。

1 VSC - HVDC 工作原理和数学模型

假设两端无穷大 VSC - HVDC 输电系统结构如图 1 所示, 两端换流器均采用 VSC, 具有相同的拓扑结构。

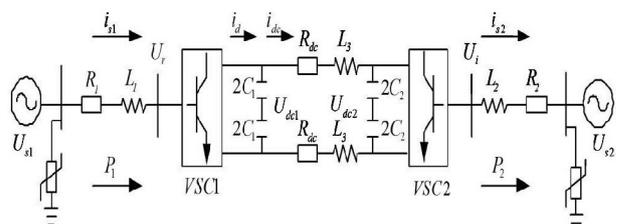


图 1 双端无穷大 VSC - HVDC 系统结构图

图 1 中 U_{s1} 、 U_r 、 i_{s1} 和 U_{s2} 、 U_i 、 i_{s2} 分别为整流侧和逆变侧的双端电源电压、换流器的交流侧电压和电

流; R_1 、 R_2 和 L_1 、 L_2 为整流侧和逆变侧换流器的等效电阻和电感 其中 $R_1 = R_2 = R$ $L_1 = L_2 = L$; C_1 、 C_2 、 R_{dc} 、 L_3 分别为直流侧两端电容和线路等效电阻、电感 其中 $C_1 = C_2 = C$; U_{dc1} 、 U_{dc2} 为直流侧两端直流电压。

由于 VSC - HVDC 系统中的整流器和逆变器的电路结构相同,且与三相电压型 PWM 换流器电路相似,如图 2。

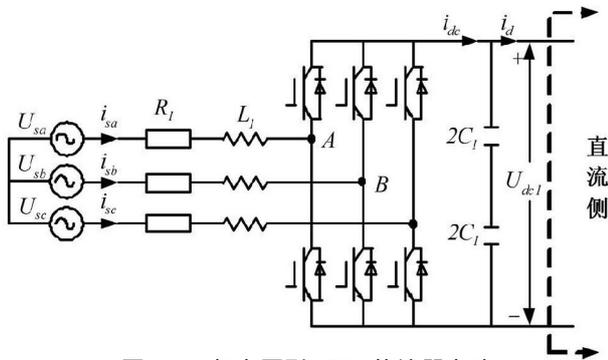


图 2 三相电压型 PWM 换流器电路

所以以整流侧电路为例,建立系统数学模型如下。

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = U_{sd} - S_d U_{dc1} + \omega L i_{sq} - R i_{sd} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = U_{sq} - S_q U_{dc1} - \omega L i_{sd} - R i_{sq} \\ C \frac{dU_{dc1}}{dt} = i_{dc} - i_d \end{cases} \quad (1)$$

式中 S_d 、 S_q 表示坐标变换后的开关函数; U_{sq} 、 U_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{sd} 分别为 U_{sabc} 、 i_{sabc} 变换后的对应的 d 、 q 轴分量。

2 PCH 模型与 L_2 增益干扰抑制

端口受控哈密顿系统(PCH)是无源性、耗散性理论研究的最新成果。考虑下面的计及耗散和干扰量的 PCH 系统方程为

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g_1(x) u + g_2(x) \omega \quad (2)$$

式中 $x \in R^n$ 是状态矢量; $u \in R^m$ 代表输入矢量; $R(x)$ 为半正定对称矩阵,反映了端口上的附加阻尼; $J(x)$ 为斜对称阵,满足 $J(x) = -J^T(x)$,反映了系统内部的互联结构; $H(x)$ 为系统的 Hamiltonian 函数; $g_1(x) u$ 等效表示外部源输入; $\omega \in R^p$ 为干扰向量且 $\omega \in L_2[0, T]$ 。

非线性 L_2 增益干扰抑制问题即在指定的罚输入信号条件下,寻找一个反馈控制率 $u = \alpha(x)$ 和正定的存储函数 $V(x)$,使得下式的耗散不等式成立。

$$\dot{V}(x) \leq -Q(x) + \frac{1}{2}(\gamma^2 \|\omega\|^2 - \|z\|^2)$$

其中 $Q(x)$ 为给定的非负函数; $\gamma > 0$ 为干扰抑制标准; $\|\cdot\|$ 为对应向量的 Euclidian 范数。

3 L_2 增益控制器设计

3.1 VSC - HVDC 参考电流计算

设计控制器时,外环控制器整流侧采用定直流电压和定无功功率控制,逆变侧采用定有功功率和无功功率的控制策略。根据生成的参考电流,设计内环无源控制器进行跟踪,以达到控制有功功率、无功功率的目的。

根据瞬时功率理论,同时,忽略换流电抗器电阻和开关损耗时,换流站的有功功率、无功功率和直流侧的有功功率的表达式如下。

$$\begin{cases} P_1 \approx P_s = \frac{3}{2}(U_{sd} i_{sd} + U_{sq} i_{sq}) \\ Q_1 = Q_s = \frac{3}{2}(U_{sq} i_{sd} - U_{sd} i_{sq}) \\ P_1 = P_{dc} = U_{dc1} \cdot i_d \end{cases} \quad (3)$$

VSC - HVDC 为三相平衡系统,令两端无穷大电源 a 相相电压的初相角为 0° ,有: $U_{sd} = U_s$, $U_{sq} = 0$,又因 U_s 一个为恒定值,所以有功功率、无功功率可以通过调节 i_{sd} 、 i_{sq} 独立来控制。

当给定有功功率、无功功率和直流侧电压的参考值 P_{ref} 、 Q_{ref} 、 U_{dc1ref} ,由式(3)得到电流的预估值 i'_{sd} 、 i'_{sq} ,为了消除稳态误差,通过三个 PI 调节器 PI(1)、PI(2)、PI(3) 把实际测得的有功功率、无功功率以及直流侧电压值和给定参考值之间的偏差转化为修正量 Δi_{sd} 、 Δi_{sq} ,然后用相应的预估值加上修正值,从而得到的内环参考电流 i_{sd}^* 、 i_{sq}^* ,PI 调节器的参数通过实验得到。

3.2 L_2 增益控制器设计

定义系统(1)的状态变量为

$$x = [x_1 \ x_2]^T = [L i_{sd} \ L i_{sq}]^T = D [i_{sd} \ i_{sq}]^T$$

并取哈密顿能量函数

$$H(x) = \frac{1}{2} x^T D^{-1} x \quad (4)$$

将它们写成端口受控干扰的耗散哈密顿形式为

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g_1(x) u + g_2(x) \omega \quad (5)$$

式中,

$$J(x) = \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} \quad R(x) = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

$$g_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u = \begin{bmatrix} U_{sd} - S_d U_{dc1} \\ U_{sq} - S_q U_{dc1} \end{bmatrix}$$

$$g_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \omega = \begin{bmatrix} \omega_d \\ \omega_q \end{bmatrix}$$

为实现对外环参考电流的跟踪,并抑制外界干扰,建立误差系统,令

$$\tilde{x} = [Li_{sd} - Li_{sd}^* \quad Li_{sq} - Li_{sq}^*]^T$$

并定义误差系统的能量函数为

$$H_d(\tilde{x}) = \frac{1}{2} \tilde{x}^T D^{-1} \tilde{x}$$

对式(5)进行等价变换,得

$$\dot{\tilde{x}}(J-R) \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} + (J-R) i_s^* - \dot{x}^* + g_1(x) u + g_2(x) \omega \quad (6)$$

取 $\varepsilon = (J-R) i_s^* - \dot{x}^* + g_1(x) u$, 并定义罚输入

矢量 $z = G \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}}$, 其中 G 为二阶单位矩阵。利用完全

平方配方法构造 γ 耗散不等式得

$$\begin{aligned} \dot{H}_d &= - \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T R \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} + \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T \varepsilon + \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T g_2 \omega \\ &= - \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T R \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} + \frac{1}{2} (\gamma^2 \|\omega\|^2 - \|z\|^2) \\ &\quad - \frac{1}{2} \|\gamma \omega - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}}\|^2 + \frac{1}{2\gamma^2} \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} + \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T \varepsilon \\ &= - \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T R \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} + \frac{1}{2} (\gamma^2 \|\omega\|^2 - \|z\|^2) \\ &\quad + \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T \left[\left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{1}{2} \right) \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} + \varepsilon \right] \\ &\quad - \frac{1}{2} \|\gamma \omega - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}}\|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

利用动态反馈注入阻尼,令

$$\varepsilon + \left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{1}{2} \right) \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} = -R_a \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \quad (8)$$

其中 $R_a = \begin{pmatrix} r_{a1} & \\ & r_{a2} \end{pmatrix}$ 且 r_{a1}, r_{a2} 均大于零。将式

(8) 带入式(7)得

$$\dot{H}_d \leq -Q + \frac{1}{2} (\gamma^2 \|\omega\|^2 - \|z\|^2)$$

$$\text{其中 } Q = \left(\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} \right)^T (R + R_a) \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}}$$

当干扰 ω 到罚输入 z 的 L_2 增益小于指令水平 γ 时,为实现对控制目标的渐近跟踪,利用公式(8)便可得到如下的控制率。

$$\begin{cases} S_d = \frac{U_{sd} - Ri_{sd}^* + \omega Li_{sq}^* - Li_{sd}^* + (r_{a1} + \frac{1}{2\gamma^2} + \frac{1}{2})(i_{sd} - i_{sd}^*)}{U_{dc1}} \\ S_q = \frac{U_{sq} - \omega Li_{sd}^* - Ri_{sq}^* - Li_{sq}^* + (r_{a2} + \frac{1}{2\gamma^2} + \frac{1}{2})(i_{sq} - i_{sq}^*)}{U_{dc1}} \end{cases} \quad (9)$$

将计算得到的 S_d, S_q 经坐标变换即可得到换流器的控制信号 S_a, S_b, S_c , 同理可以得到逆变侧的控制信号。控制框图如图3。

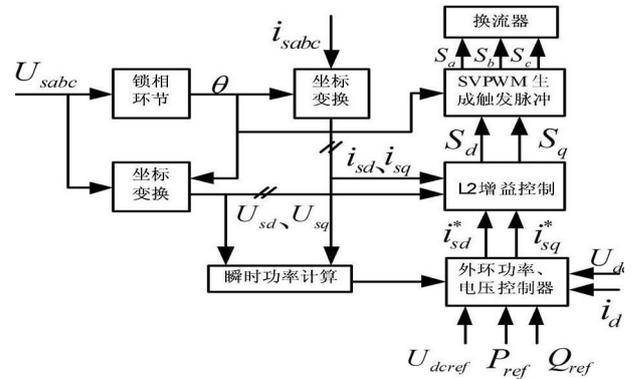


图3 系统控制框图

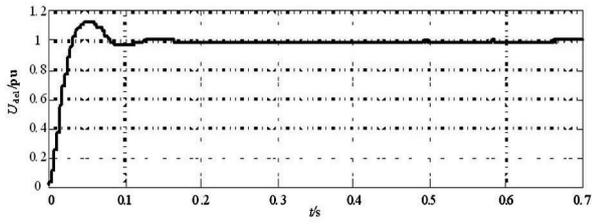
4 仿真分析

为验证所设计的控制器的有效性,在 Matlab 中搭建了图1所示的 VSC-HVDC 系统。其主要参数如下:交流母线额定电压 $U_{s1} = U_{s2} = 10$ kV,直流电压 $U_{dc} = 20$ kV,交流侧电感和电阻分别为 $L_1 = L_2 = 15$ mH $R = 0.2 \Omega$,直流侧电感 $L_3 = 20$ mH,直流侧等效电阻 $R_{dc} = 0.5 \Omega$,直流侧电容 $C_1 = C_2 = 7$ mF,变流器额定功率为 14 MW。所有值均采用标么值表示,交流侧和直流侧的基准功率为 12.4 MW,交流侧基准电压为 8.16 kV,交流侧电流基准值为 1 kA;直流侧电压基准值 20 kV,电流基准为 600 A。取注入阻尼参数 $r_{a1} = 10$ $r_{a2} = 10$; $\gamma = 0.2$ 。

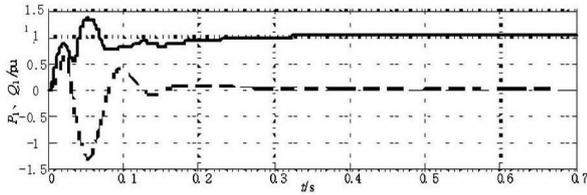
稳态工作时,整流器和逆变器的直流侧电压以及有功功率定值均为 1.0,无功功率定值为 0。取上述参数,仿真结果如图4、图5所示。图4为整流侧直流电压 U_{dc1} 、有功和无功功率 P_1, Q_1 的响应波形;图5为逆变侧直流电压 U_{dc2} 、有功和无功功率 P_2, Q_2 的响应波形。在有功功率、无功功率波形图中,实线表示有功功率,虚线表示无功功率。

当系统在 $t = 1$ s 整流侧发生有功功率阶跃响应 (-0.1 p. u.); $t = 1.7$ s 整流侧无功功率发生阶跃响应 (-0.1 p. u.) 时,仿真结果如图6、图7所示。图6为整

流侧直流电压 U_{dc1} 和有功、无功功率 P_1 、 Q_1 的响应波形;图7为逆变侧对应的 U_{dc2} 和 P_2 、 Q_2 响应波形。

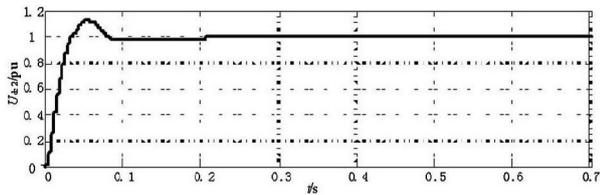


(a) 整流侧的直流电压

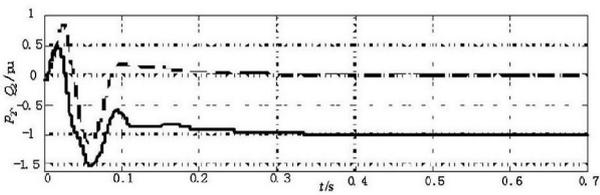


(b) 整流侧的有功、无功功率

图4 启动试验整流侧的波形

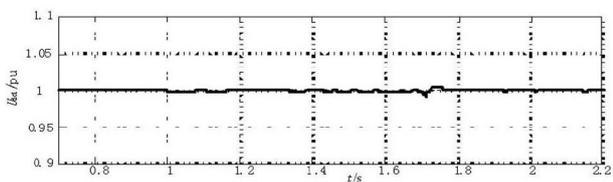


(a) 逆变侧的直流电压

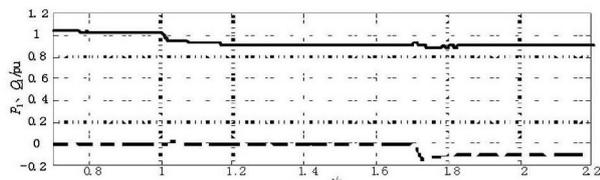


(b) 逆变侧的有功、无功功率

图5 启动试验逆变侧的波形



(a) 整流侧直流电压



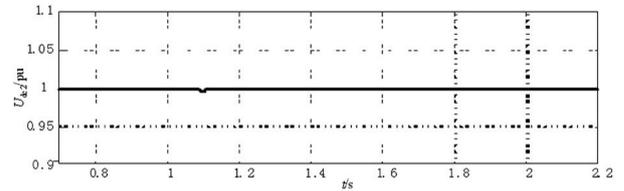
(b) 整流侧的有功、无功功率

图6 有功、无功功率阶跃响应整流侧波形

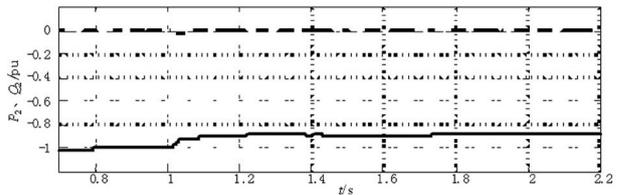
整流侧的系统电压保持不变,在3.3s时逆变侧的系统电压阶跃至0.8 p.u.,并持续0.1s后恢复,仿真结果如图8所示。

通过仿真实验,可以看出系统在0.2s时系统

到达稳态,并且直流侧电压和有功、无功功率的超调量很小;通过功率阶跃实验,说明该控制器能实现有功、无功功率的独立调节,而且在调节过程中直流电压抖动幅度很小。交流侧电压发生变化时,直流侧电压及无功功率几乎保持恒定,有功功率在系统变化的瞬间仅发生微小的波动,然后迅速恢复到原来稳态值,说明控制器对外部扰动具有较强的鲁棒性。

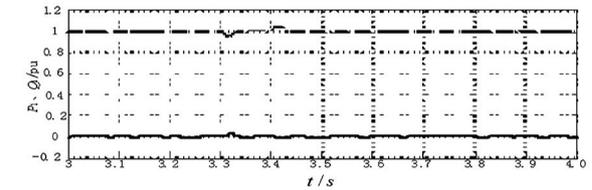


(a) 逆变侧的直流电压

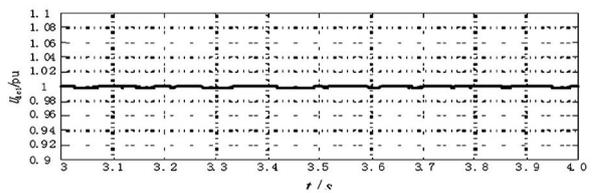


(b) 逆变侧的有功、无功功率

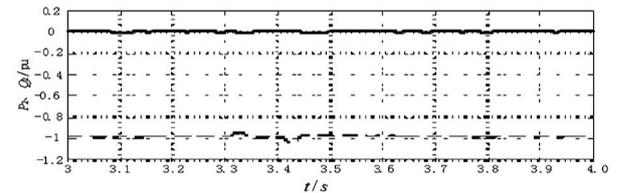
图7 有功、无功功率阶跃响应逆变侧的波形



(a) 整流侧的有功、无功功率



(b) 整流侧的直流电压



(c) 逆变侧的有功、无功功率

图8 逆变侧的系统电压变化时换流站的响应

5 结论

首先建立了 VSC-HVDC 输电系统在 dq 坐标系下的数学模型,应用双闭环的控制策略,外环采用定直

流侧电压和定有功、无功功率来生成内环 dq 轴参考电流;内环采用基于 PCHD 模型 L_2 增益控制器来追踪参考电流,从而达到独立调节有功和无功功率及控制外部干扰的目的。仿真结果表明,所设计的 L_2 增益控制器具有很高的稳态精度及快速的响应速度,且能实现有功、无功功率的独立调节和对外部干扰的抑制。

参考文献

[1] 陈谦,唐国庆,胡铭.采用 dq 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.

[2] 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.

[3] 陈海荣,徐政.向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的控制器设计[J].中国电机工程学报,2006,26(23):42-48.

[4] 梁海峰,李庚银,李广凯,等.向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的系统仿真研究[J].电网技术,2005,29(8):45-50.

[5] Liu Zhongqi, Shao Weijun, Song Qiang. A Novel Nonlinear Decoupled Controller for VSC-HVDC System[C]. Power and Energy Engineering Conference 2009, Asia-Pacific.

[6] 李国栋,毛承雄,陆继明,等.基于逆系统理论的 VSC-HVDC 新型控制[J].高电压技术,2005,31(31):45-50.

[7] Jovcic D, Lamont L, Abbott K. Control System Design for

VSC Transmission [J]. Electric Power Systems Research. 2007, 77(7):721-729.

[8] Lee Tzann Shin. Lagrangian Modeling and Passivity Based Control of Three-phase AC/DC Voltage-source Converter [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2004, 51(4):892-902.

[9] 孙元章,刘前进,杨新林.非线性控制中的 L_2 增益和无源化方法[M].北京:清华大学出版社,2002.

[10] 杨贵杰,孙力,崔乃政,等.空间矢量脉宽调制方法的研究[J].中国电机工程学报,2001,21(5):79-83.

[11] 王久和.电压型 PWM 整流器的非线性控制[M].北京:机械工业出版社,2008.

[12] 孙元章,焦晓红,申铁龙.电力系统非线性鲁棒控制[M].北京:清华大学出版社,2007.

作者简介:

付永良(1987),硕士研究生,从事新型高压直流输电方面的研究;

王奔(1960),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统非线性及变结构控制;

陈新华(1987),女,硕士研究生,研究方向为牵引变压器保护双重化;

邓大磊(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量控制;

王吉庆(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量控制。(收稿日期:2013-03-06)

(上接第9页)

参考文献

[1] 黄宗君,李兴源,晁剑,等.贵阳南部电网“7.7”事故的仿真反演和分析[J].电力系统自动化,2007,31(9):95-100.

[2] P. Kundur,周孝信,李兴源,译.电力系统稳定和控制[M].北京:中国电力出版社,2002.

[3] Horne J, Flynn D, Littler T. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition 2004.

[4] 耿天翔.负荷特性对电压稳定性影响分析[J].科技创新导报,2012(10):83.

[5] 熊小伏,周永忠,周家启.计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J].中国电机工程学报,2005(19):48-51.

[6] 段俊东,黄家兴.负荷动态特性变化对电力系统静态电压稳定性的影响研究[J].工矿自动化,2012(2):44-48.

[7] 翟庆志,李艳军,刘明丹.电机学[M].北京:中国电力出版社,2002.

[8] 刘健,毕鹏翔,董海鹏.复杂配电网简化分析与优化[M].北京:中国电力出版社,2002.

[9] 汤涌,侯俊贤,刘文焯.电力系统数字仿真负荷模型中配电网及无功补偿与感应电动机的模拟[J].中国电机工程学报,2005,25(3):8-12.

[10] 赵强,王丽敏,刘肇旭.全国电网互联系统频率特性及低频减载方案[J].电网技术,2009,33(8):35-40.

[11] New W C, Brown B J, Goff P G, et al. Load Shedding, Load Restoration and Generator Protection Using Solid-State Andelectromechanical Under Frequencyrelay [EB/OL]. Generalelectric Company. http://pm.geindustrial.com/FAQ/Documents/489/GET-6449.pdf,1974.

作者简介:

周专(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,硕士生导师,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制、调度自动化;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制。(收稿日期:2013-04-24)