

基于最优变目标的 HVDC与 SVC非线性综合协调控制

杨波, 刘天琪, 李兴源, 刘剑

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 直流功率调制能有效地提高交直流系统的稳定性,但同时直流换流站也要消耗大量的无功,影响交流系统的电压稳定。为此,提出了基于最优变目标的 HVDC与 SVC综合控制策略,通过直流功率调制改善系统稳定性的同时,利用 SVC来对直流逆变侧进行无功补偿,使逆变侧电压更具稳定性。首先建立了交直流混合系统中 HVDC与 SVC的综合控制模型,在此基础上,推导出基于最优变目标的控制理论的 HVDC与 SVC非线性综合控制策略。仿真结果表明,以该控制策略设计的控制器能有效地提高系统阻尼,改善逆变侧交流母线电压特性。

关键词: 最优变目标控制; 暂态稳定; HVDC; SVC

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)17-0029-05

0 引言

直流输电将以其高度可控,快速调节,传输功率大,运行灵活等特点,在远距离大容量输电以及区域系统互连等方面发挥越来越重要的作用^[1,2]。利用直流输电的快速恢复作为对交流系统紧急支援的一种手段,将有效地提高交流系统的暂态稳定性。但直流输电的应用也给电力系统带来了新的挑战;直流换流器在工作中要消耗相当大的感性无功功率,逆变侧交流母线电压成为人们关注的问题之一。如果在逆变侧发生大扰动,将会引起交流母线电压的下降,且逆变侧需要更多无功,导致电压进一步下降,严重时可能引发电压崩溃^[2]。

随着电力电子技术的发展,静止无功补偿器(SVC)在电力系统中得到了大量的应用,它比以往的调相机具有投资省、损耗小、维护简单、可靠性高,特别是响应速度快、控制效果显著等一系列优点,受到人们的广泛重视^[3]。若是将 SVC用于对直流系统逆变侧无功的控制,将是一种理想的选择。

最优目标控制^[4]OAC(Optimal - Aim Control)取决于系统状态方程和当前状态,因此具有跟踪和自适应能力,已在电力系统中得到较多应用,但因其是直接驱动系统达到平衡点,当故障后系统在平衡点所确定的控制区域之外时,就难以达到理想的效果。鉴于此,文献[5]根据电力系统自身的特性,以 OAC为基础提出了最优变目标控制(OVAC)策略,它是将系统

趋于稳定点的过程分段实现,避免了系统在稳定域之外时直接驱动系统达到平衡点的情况。

由于电力系统是一强非线性系统,对其采用非线性控制更为合理有效。在交直流混合系统中,如何协调 HVDC与 SVC的控制,使其作用互补,更有效地改善交直流混合系统的动态特性,是很值得研究的问题。本文首次应用最优变目标理论实现 HVDC与 SVC的综合协调控制,在建立 HVDC与 SVC综合系统模型的基础上,提出了 HVDC与 SVC的最优变目标协调综合控制策略。进一步针对三机交直流混合系统进行了仿真计算。仿真结果表明,由此控制理论设计的控制器能明显改善系统的动态特性,有效增加系统阻尼,抑制功角摇摆的同时,为 SVC接入点(逆变侧交流母线)提供有力的电压动态支持。

1 最优变目标控制原理

1.1 最优目标控制理论

对于非线性控制系统

$$\dot{x}(t) = f(x(t), t) + bu(t) \quad (1)$$

式中:状态函数 $x \in R^n$;控制量 $u(t) = \{\phi \in R^m \mid \phi_j \in [\underline{\Phi}_j, \overline{\Phi}_j], j = 1, 2, \dots, m\}$, b 为 $n \times m$ 矩阵,且 $bb^T > 0$ 。

OAC主要元素如图 1所示。

图中,系统轨迹为 $x(t)$;在时刻 t 定义参考矢量 $(x^*(t) = x^*(t) - x(t), x^*(t)$ 为目标状态;在任意时刻容许控制量 ϕ 作用下的轨迹切矢量为 $S = f(x(t), t) - S, (S, R^n)$,参考矢量与切矢量之间

基金项目:国家自然科学基金项目(50377017);许继电力科技专项资助基金项目;973项目(2004CB217909)

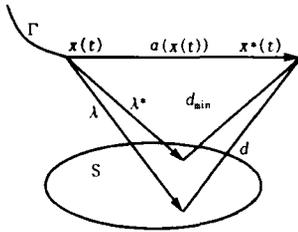


图 1 OAC几何示意图

Fig 1 Geometric view of OAC

的距离为 $d = \|x(t) - x^*(t)\|$ 。

最优目标策略就是要找到一个分段连续的控制函数 $u(t)$, 确定相应的切矢量 λ^* , 使得 d 最小, 从而更快地趋近目标状态, 即:

$$d_{min} = \|x(t) - x^*(t)\|$$

由于推导的复杂性, 本文不再具体列写, 其具体推导过程见文献 [4] 和 [8], 则系统 (1) 的最优目标控制解为:

$$u(t) = \{ (b^T b)^{-1} b^T [x^*(t) - x(t) - f(x(t), t)] \} \quad (2)$$

式中: θ 为考虑了控制量 $u(t)$ 的允许阈值。

1.2 最优变目标控制的基本思想 [5~7]

用最优目标控制理论推导出来的最优控制解对系统进行控制时, 它是直接驱动系统直接到达稳定平衡点 $x^*(t)$ 。但复杂的非线性系统可能存在多个稳定平衡点 x_i^* , 每个稳定平衡点对应一个最有效控制所确定的最大稳定域, 相应地记为 Σ_i 。而切除故障时, 如果系统状态 $x(t)$ 在 Σ_i 以外, 则系统不可能再返回到 x_i^* , 从而出现滑极运行状态, 显然在这种情况下, 仍试图直接驱动系统恢复到 x_i^* 点, 不可能获得理想的控制效果。

电力系统在受到严重扰动后, 机械功率与电磁功率之间的平衡被破坏。发电机转子由于动能过剩而加速, 进而导致失步。为了保持暂态稳定, 必须按照最大能量耗散原理消除可能引起发电机失步的过剩动能, 然后才是以故障之后系统的动力学平衡点为驱动目标, 稳定系统。

鉴于电力系统上述特点以及 OAC 的不足, 文献 [5] 提出了最优变目标控制策略。其基本思想是: 首先驱动系统到达按最大稳定域选择的人工中间稳定平衡点, 当系统进入期望的稳定平衡点稳定域时, 再驱动系统到达该稳定平衡点, 人工中间平衡点是按照暂态能量函数法所选取的。

2 系统数学描述

2.1 HVDC功率调制器

功率调制器设计的目的是: 当交流系统受到扰动时, 通过调制直流线路的传输功率, 以保持整个系统的稳定性。HVDC功率调制器是在原有的直流功率整定值 $P_{dc,ref}$ 的基础上引入了非线性控制器所产生的调制信号, 从而得到一个新的整定值 P_{ref} , 这样能够更好地根据系统工况的变化更为准确地调节直流输送功率, 提高系统的暂态稳定性。

在交直流混合系统中, 高压直流输电系统的基本控制通常采用整流侧定直流电流, 逆变侧定熄弧角控制。由于直流系统的快速响应特性, 本文采用了直流功率的一阶模型:

$$P_{dc}^e = \frac{1}{T_d} (-P_{dc} + P_{dc,ref} + u_{dc}) \quad (3)$$

其中: T_d 为直流系统时间常数, u_{dc} 为直流系统控制量。

2.2 SVC控制原理

SVC的等效电路图如图 2 所示, 它由一个可连续调节的电抗器 B_L 和一个固定电容器 B_C 组成, 通过改变可控硅的触发角来改变可变电感的导纳, 从而改变整个 SVC 的导纳以调节它对系统所提供的无功 [9, 10]。

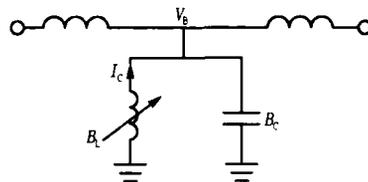


图 2 SVC等效电路图

Fig 2 Equivalent circuit of SVC

由图 2 可得 SVC 接入点电压 V_b 与可变电抗器上电流的关系为:

$$V_b = I_c / B_L \quad (4)$$

SVC 也采用一阶惯性环节, 如图 3 所示。

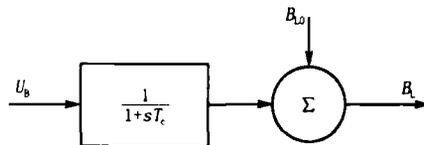


图 3 线性化 SVC 模型

Fig 3 Model of linearized SVC

$$B_L = \frac{1}{T_c} (-B_L + B_{L0} + u_b) \quad (5)$$

其中: T_c 为 SVC 的综合惯性时间常数, B_{L0} 为电纳 B_L 的初始值, I_c 为流过可变电抗器 B_L 上的电流, u_b 为 SVC 控制器的控制输入量。

2.3 系统数学模型

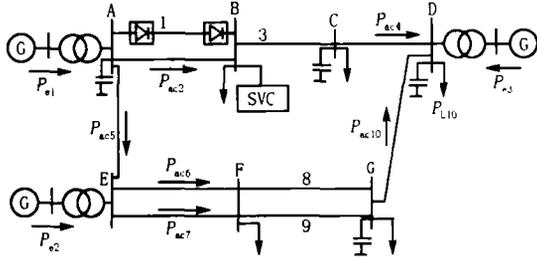


图 4 仿真测试系统模型

Fig 4 Model of the study system

包含 HVDC 的三机系统如图 4 所示,由于 SVC 接入点为逆变侧母线 B,则可认为直流逆变侧直流电压与母线 B 上电压存在关系(逆变侧变压器变比标么值近似为 1): $V_{di} = \frac{3\sqrt{6}}{B_L} V_B \cos$,即 $\frac{P_{dc}}{I_d} = \frac{3\sqrt{6}}{B_L} \cos$,则有:

$$P_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{B_L} I_d \cos \quad (6)$$

由图 4 可知发电机电磁功率 P_{ei} 与各线路功率关系如下:

$$P_{e1} = P_{dc} + P_{ac2} + P_{ac5} \quad (7)$$

$$P_{e2} = P_{ac6} + P_{ac7} - P_{ac5} \quad (8)$$

$$P_{e3} = P_{L10} - P_{ac4} - P_{ac10} \quad (9)$$

选择发电机 G_3 为参考机,发电机采用二阶模型,假设输入的机械功率恒定,且根据文献 [12],设 $\frac{D_1}{H_1} = \frac{D_2}{H_2} = \frac{D_3}{H_3} = \frac{D}{H} = 0.3$,则有:

$$\dot{z}_3 = z_3 \quad (10)$$

$$\dot{z}_2 = \left(\frac{0}{H_2} P_{m2} - \frac{0}{H_3} P_{m3} \right) - \frac{D}{H} z_2 - \left(\frac{0}{H_2} P_{e2} - \frac{0}{H_3} P_{e3} \right) \quad (11)$$

$$\dot{z}_4 = z_4 \quad (12)$$

$$\dot{z}_5 = \left(\frac{0}{H_1} P_{m1} - \frac{0}{H_3} P_{m3} \right) - \frac{D}{H} z_5 - \left(\frac{0}{H_1} P_{e1} - \frac{0}{H_3} P_{e3} \right) \quad (13)$$

3 HVDC 与 SVC 的最优变目标综合控制策略

3.1 状态变量的选择

由实践经验可知,在提高电力系统暂态稳定性的控制中,由于将 z_2 和 z_5 引入反馈可得到更好的动态特性,再由自动控制理论可知,任何动态系统在外部的等效的前提下,内部状态变量的选取不是唯一的。针对本测试系统,选择如下状态变量^[5]: $z = [z_4, z_2,$

$z_3, z_4, z_5, z_6]^T = [z_3, z_2, z_4, z_5, z_6]^T$,则在新状态变量下原系统可表示为:

$$\dot{z}_4^g = z_2 \quad (14)$$

$$\dot{z}_2^g = \left(\frac{0}{H_2} P_{m2} - \frac{0}{H_3} P_{m3} \right) - \frac{D}{H} z_2 - \left(\frac{0}{H_2} P_{e2} - \frac{0}{H_3} P_{e3} \right) \quad (15)$$

$$\dot{z}_3^g = z_4 \quad (16)$$

$$\dot{z}_4^g = z_5 \quad (17)$$

$$\dot{z}_5^g = -\frac{D}{H} z_5 - \left[\frac{0}{H_1} \frac{1}{T_d} (-P_{dc} + P_{dcref} + u_{dc}) + P_{ac}^g \right] \quad (18)$$

$$\dot{z}_6^g = -\frac{3\sqrt{6}}{B_L^2} \frac{I_d I_d}{\cos} \cdot \frac{1}{T_C} (-B_L + B_{L0} + u_B) + \frac{3\sqrt{6}}{B_L} \frac{(I_d^g I_d + I_c I_d^g)}{\cos} \quad (19)$$

式中: $P_{ac}^g = \frac{0}{H_1} (P_{ac2} + P_{ac5}) + \frac{0}{H_3} (P_{ac4} + P_{ac10})$

3.2 最优变目标综合控制策略

根据式 (14) ~ (19) 写出标准系统状态空间方程:

$$\dot{z}^g = f(z) + bu \quad (20)$$

$$\text{式中: } b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{0}{H_1 T_d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{3\sqrt{6}}{B_L^2 T_C} \frac{I_d I_d}{\cos} \end{bmatrix}^T,$$

$$u = [u_{dc}, u_B]^T,$$

$$f(z) =$$

$$\begin{bmatrix} z_2 \\ \left(\frac{0}{H_2} P_{m2} - \frac{0}{H_3} P_{m3} \right) - \frac{D}{H} z_2 - \left(\frac{0}{H_2} P_{e2} - \frac{0}{H_3} P_{e3} \right) \\ z_4 \\ z_5 \\ -\frac{D}{H} z_5 - \left[\frac{0}{H_1} \frac{1}{T_d} (-P_{dc} + P_{dcref}) + P_{ac}^g \right] \\ -\frac{3\sqrt{6}}{B_L^2} \frac{I_d I_d}{\cos} \cdot \frac{1}{T_C} (-B_L + B_{L0}) + \frac{3\sqrt{6}}{B_L} \frac{(I_d^g I_d + I_c I_d^g)}{\cos} \end{bmatrix}$$

将式 (20) 带入式 (2), 得到 HVDC 与 SVC 的综合控制规律:

$$u_{dc} = u_{dc} \left(-\frac{H_1 T_d}{0} \left[(\dot{z}_5^g - z_5^g) + \frac{D}{H} z_5^g + \frac{0}{H_1 T_d} (-P_{dc} + P_{dcref}) + P_{ac}^g \right] \right) \quad (21)$$

$$u_B = \frac{B_L^2 T_c}{3\sqrt{6} I_c I_d \cos} (z_6^* - z_6) + (B_L - B_{L0}) - \frac{T_c}{I_c I_d} (I_c I_d + I_c I_d) \quad (22)$$

其中: z_6^* 在滑差过零前取人工中间稳定平衡点的值, 在滑差过零之后, 取故障后稳定平衡点的值, 在系统的各种运行方式中, 必然有一种方式的稳定平衡点使系统的临界能量最大, 即有最大的暂态稳定域。根据系统的暂态能量函数, 不难求出人工中间稳定平衡点为:

$$z_6^* = [0, 0, 0, 0, 0, P_{dref}]^T \quad (23)$$

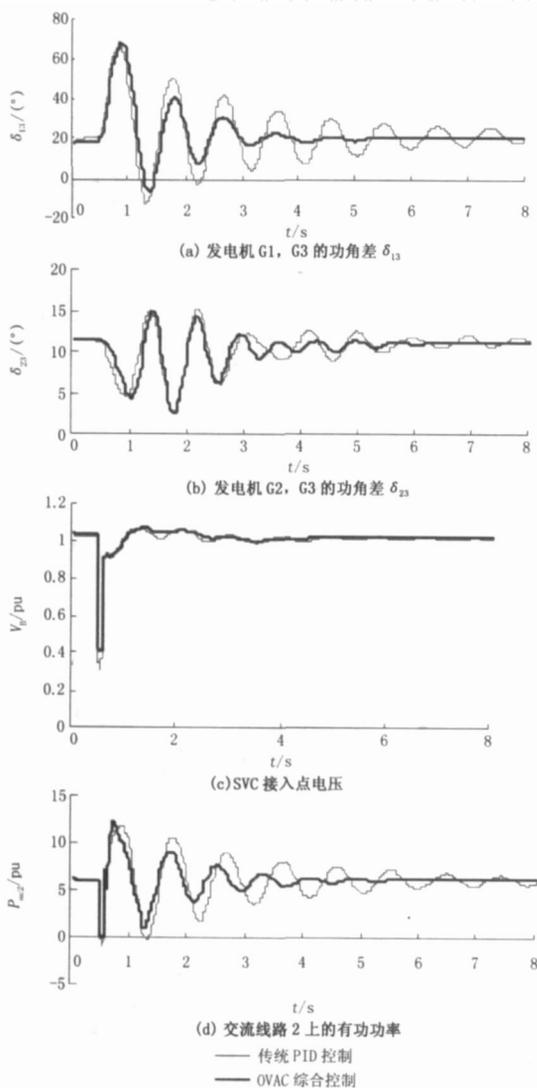


图 5 线路 BC 上三相瞬时故障时系统响应

Fig 5 System responses with a temporary three-phase fault at line BC

4 仿真分析

在采用 NETOMAC 仿真软件应用所求得的控制规律, 对图 4 所示的交直流系统进行动态仿真, 系统参数见文献 [11], 直流系统的初始条件为: 整流器触发滞后角为 $\alpha = 15^\circ$; 逆变器关断越前角 $\gamma = 18^\circ$; 数字仿真考察了逆变侧线路 3 上靠近母线 C 处发生故障时系统的功角和逆变器交流母线上的电压变化情况。故障为三相短路, 开始时间为 0.2 s, 并于 100 ms 后切除。

当线路 BC 上发生故障时, 从图 5 可以看出, 较之传统 PD 控制, 最优变目标综合控制很好地改善了交直流互连系统的暂态稳定性, 有效地增强了系统阻尼, 减小了发电机功角波动幅度和次数, 交流线路 AB 上的有功功率的摇摆也得到了有效的控制, 同时 SVC 接入点电压也得到了较好的改善。

5 结论

本文研究了 HVDC 与 SVC 的综合控制问题, 目的在于提高系统的暂态稳定性和改善逆变侧交流电压。首先对三机系统中 HVDC 与 SVC 建立综合模型, 再用最优变目标理论推导出 HVDC 与 SVC 的综合控制规律。仿真结果表明, 该控制规律能有效地增强系统阻尼, 抑制发电机功角摇摆, 同时能较好地改善逆变侧交流母线电压。

参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
LI Xing-yuan. The Operating and Control of HVDC System [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [2] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
The Scientific and Research Team of HVDC in Zhejiang University. The Transmission of HVDC [M]. Beijing: Electric Power Industry Press, 1982.
- [3] 苏建设, 陈陈. 考虑非线性负荷的静止无功补偿器控制研究 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 12-15.
SU Jian-she, CHEN Chen. Study on SVC Control for Power Systems with Nonlinear Loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 12-15.
- [4] Bamard R D. Optimal-aim Control Strategies Applied to Large-scale Nonlinear Regulation and Tracking System [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1976, 23(12): 800-806.
- [5] 李兴源, 刘取, 高景德. 多机电力系统再同步最优变目

- 标控制 [J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(4): 33-37.
- LIXing-yuan, LU Qu, GAO Jing-de. Optimal-variable-Aim Control of Resynchronization in Multimachine Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(4): 33-37.
- [6] 鲜艳霞, 李兴源. HVDC与发电机励磁的非线性控制策略 [J]. 电网技术, 2004, 28(14): 32-35.
- XIAN Yan-xia, LIXing-yuan. A Comprehensive Nonlinear Control Strategy of HVDC and Generator Excitation [J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 32-35.
- [7] 李兴源, 刘红超, 邱小燕, 等. 改善暂态稳定性的 HVDC非线性控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 33-37.
- LIXing-yuan, LU Hong-chao, QIU Xiao-yan, et al. A Nonlinear Control Strategy of HVDC for Improving Transient Stability of Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(14): 33-37.
- [8] Bamard R D. An Optimal-aim Control Strategy for Nonlinear Regulation System [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1975, 20(2): 200-208.
- [9] 马幼捷. SVC与发电机励磁协调非线性控制 [J]. 电工技术学报, 1998, 13(4): 1-5.
- MA You-jie. The Nonlinear Control of SVC Cooperate with the Excitation System of Generator [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 1998, 13(4): 1-5.
- [10] 王雁凌, 任震, 王官洁. 静止无功补偿器在高压直流系统中的应用 [J]. 电网技术, 1996, 20(12): 34-37.
- WANG Yan-ling, REN Zhen, WANG Guan-jie. Application of SVC in HVDC [J]. Power System Technology, 1996, 20(12): 34-37.
- [11] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- LU Qiang, SUN Yuan-zhang. Power Systems Nonlinear Control [M]. Beijing: Science Press, 1993.

收稿日期: 2006-04-03; 修回日期: 2006-05-30

作者简介:

杨波 (1980 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: ybo2008@163.com

刘天琪 (1962 -), 女, 教授, 博士, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制, 调度自动化;

李兴源 (1945 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和, 高压直流输电。

Complex nonlinear control of HVDC and SVC based on OVAC

YANG Bo, LU Tian-qi, LIXing-yuan, LU Jian

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: HVDC power modulation can improve the stability of AC/DC systems, but the converter will consume much of reactive power, which influences the AC system voltage. For this reason, a complex control strategy of HVDC and SVC based on optimal variable object control theory is proposed. HVDC is adopted to improve system stability, meanwhile, SVC is adopted to compensate reactive power of inverter so that it makes the voltage at inverter side more stable. First, the model of HVDC and SVC is built, and then the complex nonlinear strategy is deduced. The simulation results show that this controller can improve the system damping and the inverter side AC voltage.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377017), XJ Special Fund for Electric Power Technology and Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CBZ17909).

Key words: OVAC; transient stability; HVDC; SVC

(上接第 28 页 continued from page 28)

Comprehensive optimization of distribution network reconfiguration and capacitor switching based on particle swarm optimization

XU Li-xiong, LU Lin, LU Jun-yong

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Distribution network reconfiguration and capacitor switching are two important aspects of distribution network optimization. This paper presents a comprehensive optimization algorithm based on particle swarm optimization for distribution network reconfiguration and capacitor switching. The algorithm brings the idea of mutation of GA into PSO to avoid prematurity, modifies update rule of PSO to deal with different types of variables, and uses "fly back" strategy to deal with the problem of exceeding position limitation of particle. The numerical example shows validity of the presented algorithm.

Key words: distribution network reconfiguration; capacitor switching; comprehensive optimization; particle swarm optimization; mutation