

基于LCC的高压直流输电换流站无功功率控制策略研究

袁小威,王金梅,苗海东,马文涛

(宁夏大学物理与电子电气工程学院,宁夏银川 750021)

摘要:针对高压直流输电换流站采用投切无功设备控制无功功率导致交流系统与换流站之间存在无功功率交换量的问题,在此基础上提出了以直流电流为主控制量,无功功率交换量和无功设备提供的无功偏差量为反馈量的控制策略。通过计算额定功率下换流站的无功功率消耗量,投切无功设备补偿换流站所需的无功功率,加入提出的控制策略,使其无论是欠补偿还是过补偿,均可实现交流系统与换流站间无功功率零交换。通过电磁暂态仿真软件(PSCAD/EMTDC)仿真研究分析,验证了该控制策略的有效性和合理性。

关键词:高压直流输电换流站;直流电流;无功功率;零交换

中图分类号:TM721 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21363

Research on the Reactive Power Control Strategy of HVDC Converter Station Based on LCC

YUAN Xiaowei, WANG Jinmei, MIAO Haidong, MA Wentao

(School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: In view of the problem of reactive power exchange between AC system and converter station caused by switching reactive power equipment to control reactive power in HVDC transmission converter station, a control strategy based on DC current as the main control quantity, reactive power exchange quantity and reactive power deviation provided by reactive power equipment as the feedback quantity was proposed. By calculating the consumption of reactive power at the converter station under the rated power, the switching reactive power equipment can compensate the reactive power required by the converter station, and the proposed control strategy was added to realize the zero exchange of reactive power between the AC system and the converter station no matter it is under compensated or overcompensated. The simulation of electromagnetic transient simulation software (PSCAD/EMTDC) verifies the effectiveness and rationality of the control strategy.

Key words: HVDC transmission converter station; DC current; reactive power; zero switching

基于采用电网换相换流器的高压直流(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)输电系统,由于其非同步通信能力强、传输的容量大、损耗小、功率调节迅速灵活且输电距离不受电网同步运行稳定性限制等优点^[1],在海底电缆送电、远距离大功率输电、大区域和非同步大电网之间的互联等方面得到了广泛的运用。但因换流器的非线性以及控制系统的复杂性,会破坏交流系统的无功平衡,因此在

直流输电系统运行时需要对交、直流系统的无功交换进行控制^[2]。有学者提出了无功功率控制因子的概念,把对交流电压的控制转化为对无功功率的控制,将转化后的无功功率和交流系统的无功功率的交集作为新的控制因子^[3],减少了控制量,但是没考虑到要充分利用换流站无功功率的优化能力。有学者提出了无功控制的功能和策略,主要是以采用滤波器和电容器投切对无功功率进行控制^[2-4],也没考虑到要利

基金项目:宁夏自然科学基金(2019AAC03027);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BFH03004)

作者简介:袁小威(1994—),男,硕士,Email:2441108426@qq.com

用换流站对无功功率的优化能力。有学者分析了无功功率后备控制功能的控制策略及其实现的方法^[5],并做了改进,提高了直流系统运行的可靠性。有学者对直流系统低功率运行时的无功功率平衡和控制策略进行分析,提出了可以增大最小关断角来吸收多余无功功率^[6],这为以后的研究提供了思路。有学者介绍了高压直流低负荷无功优化功能的原理及其在直流输电系统中的2种不同实现方式^[7],但两者并没有结合。所以本文针对整流侧进行研究,基于直流电压直接控制型、无功交换直接控制型无功控制的2种不同实现方式^[7],将2种控制方式加以结合,并作出适当调整,提出了以直流电流为主控制量,无功功率交换量和无功设备提供的无功偏差量为反馈量的控制策略,通过仿真分析,可实现换流站无功功率控制。

1 换流站无功功率特性

1.1 无功功率平衡特性分析

换流站与交流系统间的无功功率交换量如图1所示。图1中, Q_s 为换流站与交流系统交换的无功功率, $Q_{dr1} + Q_{dr2}$ 为换流站无功功率消耗量, Q_r 为投入交流滤波器和电容的总无功功率补偿量。

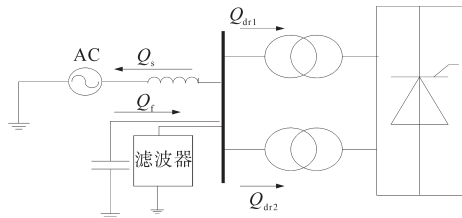


图1 换流站无功功率交换图

Fig.1 Reactive power exchange diagram of converter station

根据图1,换流站与交流系统之间的无功功率交换量可表示为

$$Q_s = Q_r - (Q_{dr1} + Q_{dr2}) \quad (1)$$

若 Q_s 为正,则交流系统吸收无功功率,反之若 Q_s 为负,则交流系统发出无功功率。一般来说,对无功功率的控制是通过投切交流滤波器、电容器补偿换流站所需的无功功率,由于交流滤波器、电容器的投切都是阶梯式地补偿无功功率,所以交流系统与换流站间的无功功率交换量在一定的无功功率交换范围内,这与交流系统的无功支撑能力相对应。

1.2 无功功率消耗特性分析

因为换流站采用的是电网换相换流器,所以换流站无论是处于整流器状态还是逆变器状态都会吸收无功功率,对于交流系统来说,换流站总是它的无功负荷^[3]。根据高压直流输电原理,换流站消耗的无功功率可以由下式得到:

$$Q_{di} = \sqrt{I_d^2 U_{d0i}^2 - P_d^2} \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

式中: U_{d0i} 为理想空载直流电压; I_d 为直流电流; P_d 为直流传输的功率; Q_{di} 为换流站消耗的无功功率, $Q_{di} = Q_{dr1} + Q_{dr2}$; $i = 1$ 时表示整流站, $i = 2$ 时表示逆变站。

由高压直流输电系统的稳态数学模型可知:

$$U_{d0i} = 3\sqrt{2} BTE_{aci}/\pi \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

$$V_{d1} = U_{d01} \cos\alpha - 3BX_{11}I_d/\pi \quad (4)$$

$$V_{d2} = U_{d02} \cos\gamma - 3BX_{12}I_d/\pi \quad (5)$$

式中: B 为串联的桥数; T 为变压器的匝数之比; E_{aci} 为变压器网侧线电压有效值; α 为整流侧触发角; γ 为逆变侧关断角; X_{11}, X_{12} 为每相的换相电抗; V_{d1} 为整流侧直流电压; V_{d2} 为逆变侧直流电压。

由式(2)可以看出,换流站无功功率消耗量与直流电流、理想空载直流电压、直流传输的功率有关。

2 换流站无功功率调节范围的计算

由式(2)所示,通过调节直流电流 I_d 就能调节换流站无功功率的消耗量,由式(4)和式(5)可以看出,通过调节整流侧触发角 α 和逆变侧关断角 γ 可以实现对直流电流 I_d 的调节,且调节时间是ms级。

下面以单极12脉动为例,讨论整流侧触发角 α 变化时,整流站所消耗的无功功率变化量。式(4)可变为

$$V_{d1} = U_{d01} \cos\alpha - 6X_{11}I_d/\pi \quad (6)$$

传输的直流功率:

$$P_d = V_{d1}I_d \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可推导出:

$$P_d = U_{d01} \cos\alpha I_d - 6X_{11}I_d^2/\pi \quad (8)$$

解式(8)得:

$$I_d = \frac{U_{d01} \cos\alpha - \sqrt{U_{d01}^2 \cos^2\alpha - \frac{24P_d X_{11}}{\pi}}}{\frac{12X_{11}}{\pi}} \quad (9)$$

对式(9)两边同时对整流侧触发角 α 求导得:

$$\frac{dI_d}{d\alpha} = \frac{U_{d01} \sin\alpha (U_{d01} \cos\alpha - \sqrt{U_{d01}^2 \cos^2\alpha - \frac{24P_d X_{l1}}{\pi}})}{\frac{12X_{l1}}{\pi} \sqrt{U_{d01}^2 \cos^2\alpha - \frac{24P_d X_{l1}}{\pi}}} > 0 \quad (10)$$

又对式(2)等式两边同时对直流电流 I_d 求导得:

$$\frac{dQ_{d1}}{dI_d} = \frac{U_{d01}^2 I_d}{\sqrt{U_{d01}^2 I_d^2 - P_d^2}} > 0 \quad (11)$$

所以,可以得出以下结论:随着触发角 α 的增大(减小),直流电流 I_d 增大(减小),整流侧电压 V_{d1} 减小(增大),逆变侧电压 V_{d2} 减小(增大),整流站无功功率消耗量增大(减小)。

量化分析计算:以搭建的国际大电网会议(international council on large electric systems, CIGRE)HVDC为例,分析触发角 α 变化时,直流电流 I_d 和整流站无功功率消耗量 Q_{d1} 的变化量。所搭建仿真模型的部分参数为: $P_d = 1000 \text{ MW}$, $X_{l1} = 0.18$ (标么值), $U_{d01} = 576.5119 \text{ kV}$ 。各变化量详细数据见表1。

表1 Q_{d1} 和 I_d 随触发角 α 变化时的变化量

Tab.1 The variation of Q_{d1} and I_d with the change of trigger angle

触发角 $\alpha/^\circ$	直流电流 I_d/kA	无功功率消耗量 Q_{d1}/Mvar
15	1.797 753 742	272.359 570 3
16	1.806 496 156	290.951 088 1
17	1.815 881 203	309.760 729 7
18	1.825 924 760	328.798 654 7

由表1可以看出,当触发角 α 变化 1° 时, I_d 变化约 0.009 kA ,换流站消耗的无功功率量 Q_{d1} 大概为 18 Mvar ,可以认为当调节 α 时,直流电流变化范围较小,可调节的换流站无功功率消耗范围较大。所以,通过投切无功设备补偿的无功功率与换流站无功功率消耗量相近的基础上,充分利用换流站对无功功率的优化能力,通过调节触发角 α 来实现交流系统与换流站间无功功率的零交换。

3 换流站无功单元配置和无功控制策略分析

3.1 换流站无功单元类型和配置

换流站补偿无功功率的无功单元一般包括滤波器、电容器等无功设备。由于换流站采用晶

闸管换相,电压和电流存在相位差,换流站相当于一个非线性元件,会在换流器的交、直流侧产生大量的谐波。谐波不仅会增加变压器的附加损耗,可能引发线路串联谐振或并联谐振,增大网损,使设备过热,降低设备的效率和利用率,还会影响测量和计量仪器的测量准确性。

滤波器是根据直流工程特征谐波的情况进行设计和配置,滤波器一般包括的类型有单调滤波器、双调谐滤波器、三调谐滤波器以及高通滤波器等,交流滤波器在其调谐频率附近为谐波提供低阻通路滤除系统谐波,但在基波频率下会为系统提供容性无功,而电容器直接对换流站的无功消耗进行补偿^[2]。双调谐滤波器除可以同时消除两个不同频率的谐波外,还具有其中一个谐振回路承受的电压低、基频下功率损耗较小、投资少、经济性好等优点。需在整流侧配备交流滤波器以滤除谐波,由于交流系统谐波成分主要有11次、13次谐波,故本文中需要配置双调谐滤波器并配置高通滤波器滤除谐波,配备电容器进行无功功率补偿。根据式(2)可以计算出额定功率下换流站的无功功率消耗量(Q_{d1}),根据无功功率消耗量计算交流滤波器、高通滤波器和电容器参数。计算配置的交流滤波器在基波频率下提供的容性无功量,剩下所需补偿的无功功率,由投切电容进行阶梯型的补偿。双调谐滤波器和高通滤波器的阻抗-频率图如图2和图3所示。

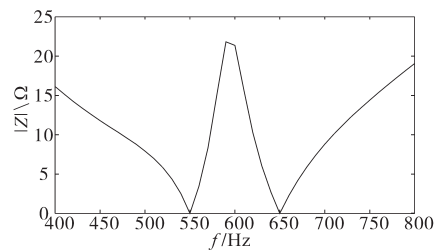


图2 双调谐滤波器阻抗-频率图

Fig.2 Impedance-frequency diagram of double-tuned filter

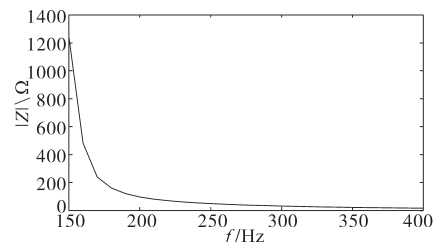


图3 高通滤波器阻抗-频率图

Fig.3 Impedance-frequency diagram of high pass filter

3.2 无功功率控制策略分析

高压直流输电系统有很多种控制方式,本

文选择整流侧为定功率控制,逆变侧为定电压控制。根据之前所述,投入固定的交流滤波器和高通滤波器,以电容器投切作为阶梯型的补偿无功功率,并充分利用换流站的无功功率调节能力,使得交流系统与换流站间实现无功功率的零交换。基于直流电压直接控制方式和无功交换直接控制方式的无功功率优化方法^[7],为了将两种控制方式加以结合,本文做以下改进:1)将直流电流作为调节量;2)对无功功率交换量的控制通过调节直流电流来调节触发角实现。基于以上研究,下面讨论无功功率优化策略。

由式(2)计算当前功率下换流站无功功率的消耗量 Q_{d1} ,根据 Q_{d1} 的大小设计并确定双调谐滤波器、高通滤波器和电容器参数,并计算无功设备提供的无功功率补偿量 Q_f ,可得到直流电流设定值 I_{dref} 为

$$I_{dref} = \frac{\sqrt{Q_f^2 + P_d^2}}{U_{d01}} \quad (12)$$

则整流侧的参考电压为

$$U_{d1ref} = \frac{P_d}{I_{dref}} \quad (13)$$

逆变侧参考电压为

$$U_{d2ref} = U_{d1ref} - I_{dref} R_d \quad (14)$$

式中: R_d 为直流电阻。

直流电流为主控制量的控制框图如图4所示。

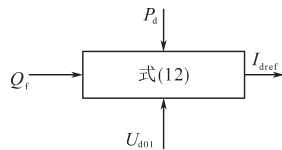


图4 直流电流为主控制的控制框图

Fig.4 The control block diagram mainly controlled with DC current

由此可知,可以通过调节直流电流来调节整流侧无功功率消耗。为了使 $Q_f = Q_{d1}$,则需要对直流电流 I_{dref} 添加一定的偏差量,对直流电流 I_{dref} 进行修正,以满足要求。对直流电流 I_{dref} 添加修正值的计算有以下2个方面:

1)以交流系统与换流站间无功功率交换量 Q_a (设定的交换量 Q_{aset}^* 为0)为反馈偏差量经过PI调节器对直流电流 I_{dref} 进行修正(修正量为 ΔI_{d1}),控制框图如图5所示。

2)以无功设备提供的无功偏差量为反馈量经过PI调节器对直流电流 I_{dref} 进行修正(修正量

为 ΔI_{d2}),控制框图如图6所示。

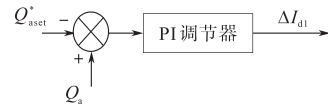


图5 以交流系统与换流站间无功功率交换量为反馈偏差量的控制框图

Fig.5 Control block diagram with reactive power exchange between AC system and converter station as feedback deviation

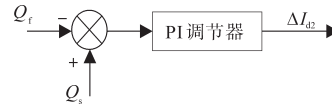


图6 以无功设备提供的无功偏差量为反馈量的控制框图

Fig.6 Control block diagram with reactive power deviation provided by reactive power equipment as feedback quantity

由图6可知,为了同时起到调节交流系统母线电压的作用,设定 Q_s 由下式得到:

$$Q_s = \frac{V_{rms}^2}{V_{rms}^2} Q_f \quad (15)$$

式中: Q_f 为无功设备提供的额定无功功率; Q_s 为无功设备提供的实际无功功率; V_{rms} 为实际交流系统母线电压有效值; V_{rms} 为额定交流系统母线电压有效值。

由式(15)结合图6控制框图可以看出,通过调节无功设备提供的无功偏差量对直流电流 I_{dref} 进行修正,可以调节交流系统母线电压,使得交流母线电压满足要求。

4 仿真分析

4.1 无功功率控制策略的实现

根据CIGRE HVDC标准测试系统,搭建如图7所示的整体仿真模型,在整流站配备定功率控制功能,在逆变站配备定电压控制功能。图8所示为图7中的整流侧无功功率详细控制框图。图7中, β_{lr} 和 β_{yr} 分别表示逆变侧采用定电流控制和定熄弧角控制时的输出量^[8], β_{lr} 表示逆变侧定电压控制的输出量。本文仅针对谐波次数设计双调谐滤波器以满足交流系统的谐波要求,暂不考虑交流滤波器的投切情况;交流母线电压控制和无功功率控制均包含在控制策略中,无功功率最大控制满足要求,故两者都不需要额外的配置。

图7、图8中, I_{cmr} 为实测的直流电流值; E_{ac1} 为实测的变压器网侧线电压有效值; Q_a 为实测的交流系统与换流站间无功功率交换量; Q_{aset}^* 设定为0 Mvar; U_{c2} 为逆变侧直流电压实测值; α_r 为整流

侧触发角; α_1 为逆变侧触发角。

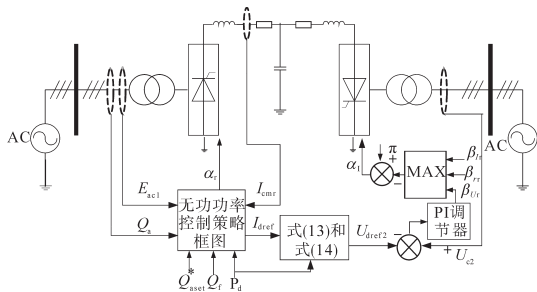


图7 含无功控制策略的直流输电系统框图

Fig.7 DC transmission system diagram with reactive power control strategy

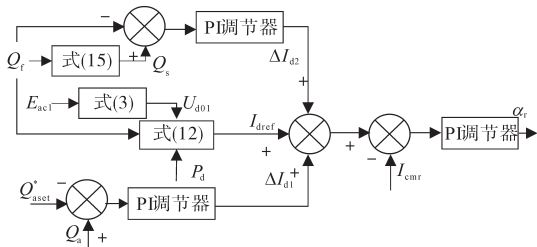


图8 无功功率控制策略框图

Fig.8 Diagram of reactive power control strategy

下面讨论无功功率控制策略实现的具体步骤:1)根据式(2)计算额定功率(P_d)下整流侧无功功率的消耗量 Q_{d1} ;2)根据3.1节所述设计双调谐滤波器和高通滤波器的参数及其在基频下的无功功率补偿量,并计算投切电容器补偿的无功功率量,确定 Q_r ;3)搭建如图7所示的仿真模型进行仿真。

4.2 仿真结果

本文以图7所示的直流输电系统框图在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型并设置参数^[8],图5中PI控制器增益 $K_p=0.000\ 1, K_i=5\ 000$;图6中PI控制器增益 $K_p=0.000\ 1, K_i=5\ 525$;图7中定电压控制的PI控制器增益 $K_p=0.003, K_i=4$;图8中定电流控制的PI控制器增益 $K_p=1.098\ 9, K_i=0.010\ 92$ 。下面以额定直流功率($P_d=1\ 000\ \text{MW}$)为例,来分析验证所提控制策略的有效性。由式(2)可以计算出额定直流功率下整流站消耗的无功功率为 $Q_{d1}=573.989\ 44\ \text{Mvar}$,通过配备双调谐滤波器,高通滤波器,设计滤波器的参数,并使得两者补偿的无功功率各为 $250\ \text{Mvar}$ 。

4.2.1 欠补偿时控制策略仿真分析

设计并计算投切电容器补偿的无功功率量为 $50\ \text{Mvar}$,总无功功率补偿量 $Q_r=550\ \text{Mvar} < Q_{d1}$ 。由于 $Q_{d1} - Q_r \approx 23.989\ 44\ \text{Mvar}$,在无功功率优化范围内,可通过调节触发角 α 来调节换流站无功

功率的消耗量 Q_{d1} 的大小,使得 $Q_{d1} = Q_r$ 。仿真波形如图9和图10所示,图11为图10的局部放大图。

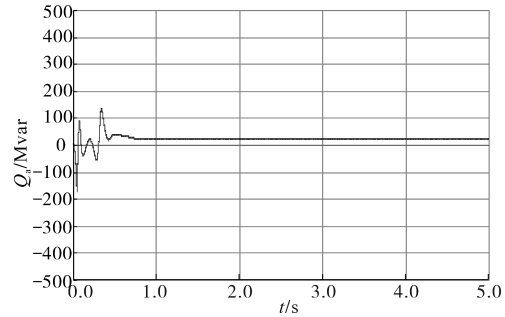


图9 欠补偿时未使用无功控制策略的无功功率交换量

Fig.9 Reactive power exchange capacity without reactive power control strategy during undercompensation

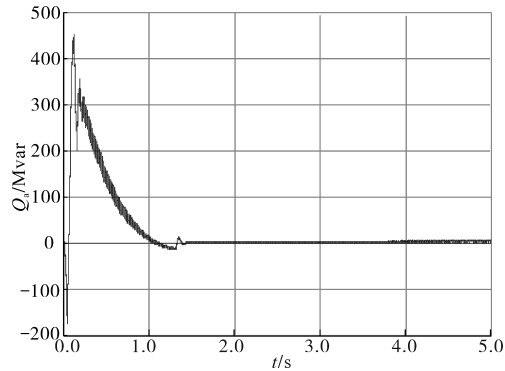


图10 欠补偿时使用无功控制策略的无功功率交换量

Fig.10 Reactive power exchange capacity using reactive power control strategy during undercompensation

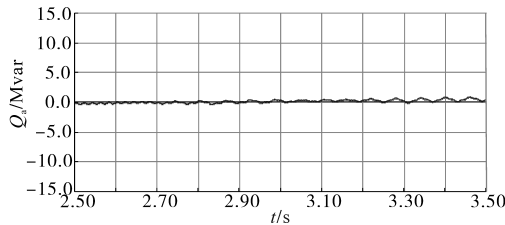


图11 图10的局部放大图

Fig.11 A partial enlargement of Fig.10

由图9可以看出,未使用无功控制策略时,换流站与交流系统无功功率交换量并未达到0;从图10可以看出,当使用无功控制策略时,换流站与交流系统无功功率交换量基本达到0。因此可以说明,在欠补偿时,所提无功功率控制策略是有效的,该控制策略能够实现交流系统与换流站间无功功率的零交换。

4.2.2 过补偿时控制策略仿真分析

设计并计算投切电容器补偿的无功功率量为 $100\ \text{Mvar}$ 。总无功功率补偿量 $Q_r=600\ \text{Mvar} > Q_{d1}$ 。由于 $Q_r - Q_{d1} \approx 26.010\ 56\ \text{Mvar}$,在无功功率优化范围内,可通过调节触发角 α 来调节换流站无功

率的消耗耗量 Q_{dl} 的大小,使得 $Q_{dl} = Q_f$ 。其仿真波形如图 12 和图 13 所示,图 14 为图 13 的局部放大图。

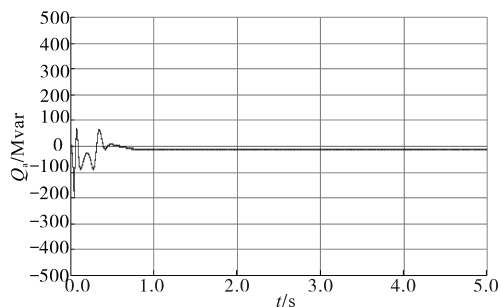


图 12 过补偿时未使用无功控制策略的无功功率交换量

Fig.12 Reactive power exchange capacity without reactive power control strategy during overcompensation

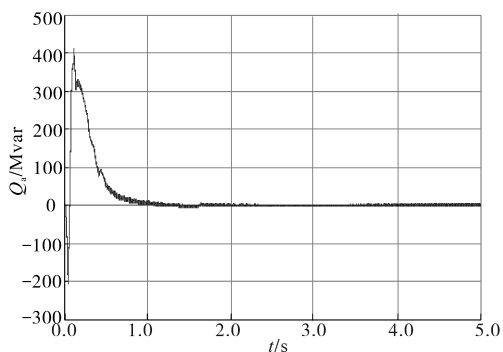


图 13 过补偿时使用无功控制策略的无功功率交换量

Fig.13 Reactive power exchange capacity using reactive power control strategy during overcompensation

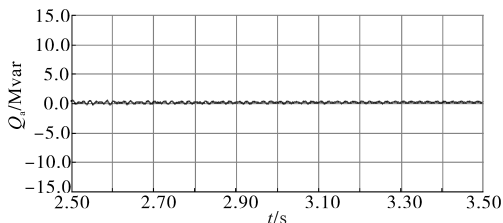


图 14 图 13 的局部放大图

Fig.14 A partial enlargement of Fig.13

由图 12 可以看出,未使用无功控制策略时,换流站与交流系统无功功率交换量并未达到 0;由图 13 可以看出,使用无功控制策略时,换流站与交流系统无功功率交换量基本达到 0。因此可以说明,在过补偿时,所提的无功功率控制策略是有效的,该控制策略能够实现交流系统与换流站间无功功率零交换。

5 结论

本文基于高压直流输电换流站都是通过投切

无功设备控制无功功率,交流系统与换流站之间仍存在无功功率交换量的问题,在满足无功控制功能的基础上,提出了以直流电流为主控制量,无功功率交换量和无功设备提供的无功偏差量为反馈量的控制策略,有效地解决了交流系统与换流站间仍存在无功功率交换量的问题,提高了系统的稳定性、设备利用率,并通过仿真研究分析验证了所提的控制策略的有效性与合理性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张望, 郝俊芳, 曹森, 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72-76.
- [3] 朱坤琳, 温渤婴. 高压直流输电系统的无功功率平衡和控制方法[J]. 电力建设, 2015, 36(9): 35-42.
- [4] 程林, 任冲, 孙震宇, 等. 高压直流输电系统无功控制策略及建模研究[J]. 青海电力, 2018, 37(4): 6-9, 24.
- [5] 刘茂涛, 张志朝, 宋述波, 等. ± 800 kV 云广特高压直流输电无功后备控制功能改进[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 93-96.
- [6] 张啸虎, 曹国云, 陈陈. 高压直流系统低功率运行时的无功控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 118-122.
- [7] 肖鸣, 傅闯, 梁志飞. 高压直流低负荷无功优化功能运行分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 91-95.
- [8] Faruque M O, Zhang Yuyan, Dinavahi Venkata. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMT-DC and PSB/SIMULINK[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 378-387.
- [9] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 直流整流站动态无功特性解析及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4886-4896.
- [10] 任震, 曾艳, 戴保明. 高压直流输电系统中 C 型阻尼滤波器的优化模型及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 123-126.
- [11] 宋蕾, 文俊, 闫金春, 等. 高压直流输电系统直流滤波器器的设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 647-651, 677.
- [12] Yoon Dong Hee, Song Hwachang, Jang Gilsoo, et al. Smart operation of HVDC systems for large penetration of wind energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 359-366.
- [13] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电无功管理的原则与算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 85-88.
- [14] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.

收稿日期:2020-01-07

修改稿日期:2020-01-19