

DOI: 10.7667/PSPC151745

辽宁绥中电厂改接高岭背靠背换流站华北侧 无功控制策略研究

王亚涛¹, 赵冠华¹, 吴彦维¹, 范延霞¹, 艾红杰¹, 史博伦²

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对高岭换流站绥中电厂由东北侧交流电网改接到华北侧交流电网的情况, 通过无功功率平衡分析和潮流计算, 从理论上校核了东北侧的无功配置情况, 并发现原交流滤波器设计已无法满足换流站的运行要求。对其新增的两组 SC 电容器共用一个断路器控制的特殊设计, 提出了新的无功控制策略。后通过现场试验验证了新的无功控制策略可行有效, 新增滤波器能满足高岭换流站大负荷运行的无功消耗。

关键词: 高压直流输电; 无功控制; 控制策略; 换流站; 交流滤波器

Strategy of reactive power control after Liaoning Suizhong power plant is connected to the north side AC of Gaoling back to back converter station

WANG Yatao¹, ZHANG Guanhua¹, WU Yanwei¹, FAN Yanxia¹, AI Hongjie¹, SHI Bolun²

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Department of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: On the condition that Suizhong power plant is connected to the North China side AC network from the Northeast side AC network in Gaoling converter station, theoretically, the northeast side of reactive power disposition and AC filter design are checked by reactive power balance analysis and flow calculation, which has been unable to meet the requirement of the operation of the converter station. This paper proposes a new reactive control strategy for the special design of the new two SC capacitors controlled by one circuit breaker. Subsequently, the feasibility of the new reactive power control strategy is verified by field test. The new filter can meet the needs of large load operation Gaoling converter station.

Key words: HVDC; RPC; control strategy; converter station; AC filter

0 引言

高岭背靠背换流站已于2008年投产运行。扩建工程于2012年11月投产运行。含东北侧和华北侧两个交流场, 设计功率输送方向为东北送华北, 换流站额定功率3 000 MW, 包括4个750 MW换流单元, 为现今世界上输送功率最大的背靠背换流站^[1]。

绥中电厂原接入东北侧交流网, 为缓解东北电网多电局势, 贯彻落实京津冀地区大气污染防治行动计划, 现2台1 000 MW机组需改接华北侧交流网, 改接后高岭换流站东北侧交流出线共4回, 其中2回至绥中电厂, 2回至沙河营变。华北侧交流出线5回, 其中2回至改接后的绥中电厂, 3回至天马变。高岭换流站位于华北电网的东北部, 属于华北电网的末端^[2]。

改接后换流站两端交流系统条件发生变化, 经校核东北侧换流站无功配置及交流滤波器设计已不满足高岭换流站运行要求。为满足高岭背靠背换流站直流满功率运行的要求, 在换流站东北侧新增2组126 Mvar的并联电容器。两组电容器并联后采用同一台断路器接入第一大组, 因其两组电容器采用同一台断路器控制其投入和切除的设计特殊性, 国内换流站无该型滤波器的应用先例, 故对原有的无功控制策略提出新的要求。

1 换流站无功平衡研究

本次绥中电厂改接引起高岭换流站两侧接入系统条件变化, 对换流站无功平衡影响较大, 需重新校核目前的无功配置。在高岭换流站成套设计中^[3],

东北侧无功平衡按交流系统具有500 Mvar无功提供能力进行换流站无功平衡。华北侧按照交流系统不具有无功提供能力进行华北侧无功平衡。在绥中电厂改接后,需要重新校核两侧交流系统无功平衡方案。并根据潮流分析的结果,提出改接工程的新增无功方案。

1.1 无功功率平衡

换流站与交流系统的无功功率平衡的定义可用式(1)所示。

$$\Delta Q = Q_{\text{filter}} - Q_{\text{conv}} \quad (1)$$

其中: Q_{filter} 表示交流滤波器或并联电容组产生的无功功率减去并联电抗器(如果有)吸收的无功功率的差值; Q_{conv} 表示换流器消耗的无功功率; 如果 $\Delta Q < 0$, 那么换流站会从交流系统吸收(输入)无功功率。如果 $\Delta Q > 0$, 那么换流站会向交流系统提供(输出)无功功率。

为了获得与交流系统无功功率交换/平衡的极值,应该采用滤波器/并联电容器产生的无功功率的极限值和换流器消耗的无功功率的极限值的组合,如式(2)。

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{max}} &= Q_{\text{filter max}} - Q_{\text{conv min}} \\ \Delta Q_{\text{min}} &= Q_{\text{filter min}} - Q_{\text{conv max}} \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 换流器无功功率消耗计算

整流器(6脉换流器)所消耗的无功功率可以根据式(3)计算(对于逆变器,应把触发角 α 换为熄弧角 γ)^[4-5]。

$$Q_{\text{conv}} = I_d \cdot U_{\text{di0}} \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu)}{4(\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu))} \quad (3)$$

$$U_{\text{di0}} = \sqrt{2} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot U_{\text{VO}} \quad (4)$$

$$\mu = \arccos(\cos \alpha - 2d_x \cdot \frac{I_d}{I_{\text{dN}}} \cdot \frac{U_{\text{di0N}}}{U_{\text{di0}}}) - \alpha \quad (5)$$

$$\alpha + \gamma + \mu = \pi \quad (6)$$

其中: Q_{conv} 为换流器消耗的无功功率; I_d 为直流电流; U_{di0} 为每个6脉动阀组的理想空载直流电压; U_{VO} 为阀侧交流线电压; d_x 为相对电感阻抗; μ 为换相角; α 为触发角; γ 为熄弧角。

在常规运行方式下,当单个单元背靠背系统输送额定功率(750 MW)时,考虑各种偏差后,在下列参数条件下输送额定功率时,东北侧换流器(12脉换流器)消耗无功功率最大: $U_{\text{di0}}=141.43 \text{ kV}$; $\mu=21.6^\circ$; $I_d=3.112 \text{ kA}$; $\alpha=18^\circ$; $U_d=120.49 \text{ kV}$ 。

则有:

$$Q_{\text{conv}} = 2 \times 3.112 \times 141.43 \times \frac{2 \times 0.377 + \sin(2 \times 0.314) - \sin(2 \times 0.691)}{4(\cos 0.314 - \cos 0.691)} \doteq 438 \text{ Mvar} \quad (7)$$

双单元运行时,东北侧换流器消耗的无功功率为876 Mvar。加上扩建的两个单元,东北侧换流器消耗的总的无功功率为1 752 Mvar。

在常规运行方式下,当单个单元背靠背系统输送额定功率(750 MW)时,考虑各种偏差后,在下列参数条件下输送额定功率时,华北侧换流器(12脉换流器)消耗无功功率最大: $U_{\text{di0}}=141.43 \text{ kV}$; $\mu=20.6^\circ$; $I_d=3.112 \text{ kA}$; $\gamma=18^\circ$; $U_d=120.49 \text{ kV}$ 。

则有:

$$Q_{\text{conv}} = 2 \times 3.112 \times 141.43 \times \frac{2 \cdot 0.360 + \sin(2 \times 0.314) - \sin(2 \times 0.674)}{4(\cos 0.314 - \cos 0.674)} \doteq 432 \text{ Mvar} \quad (8)$$

双单元运行时,华北侧换流器消耗的无功功率为874 Mvar。加上扩建的两个单元,华北侧换流器消耗的总的无功功率为1 728 Mvar。

直流运行功率2 800 MW时东北侧和华北侧无功消耗计算结果如表1和表2所示。

表1 直流功率2 800 MW时正常无功消耗

Table 1 Normal reactive power consumption when DC power is 2 800 MW

整流侧		逆变侧	
U_{dR}	252.8 kV	U_{dI}	251.7 kV
U_{di0R}	142.8 kV	U_{di0I}	142.3 kV
U_{VR}	105.8 kV	U_{VI}	105.3 kV
P_{convR}	2 826 MW	P_{convI}	2 787 MW
α	15°	γ	17°
μ_{R}	20.5°	μ_{I}	19.5°
d_{xR}	8.2%	d_{xI}	8.2%
Q_{dc}	1 417.6 Mvar	Q_{dc}	1 469.4 Mvar

表2 直流功率2 800 MW 时最大无功消耗

Table 2 Maximum reactive power consumption when DC power is 2 800 MW

整流侧		逆变侧	
U_{dR}	250.0 kV	U_{dI}	248.9 kV
U_{di0R}	143.6 kV	U_{di0I}	141.7 kV
U_{VR}	106.4 kV	U_{VI}	104.9 kV
P_{convR}	2 826 MW	P_{convI}	2 786 MW
α	18°	γ	18°
μ_{R}	19.1°	μ_{I}	19.2°
d_{xR}	8.2%	d_{xI}	8.2%
Q_{dc}	1 536.6 Mvar	Q_{dc}	1 520.4 Mvar

1.3 潮流计算

本次潮流计算^[2]采用中国版BPA4.0。高岭直流最大功率3 000 MW。绥中电厂2台1 000 MW机组满发。东北侧和华北侧潮流计算考虑以下两种典型方式。

方式1: 绥中电厂开2台800 MW机组, 高岭直流功率3 000 MW。

方式2: 绥中电厂开1台800 MW机组, 高岭直流功率2 800 MW。

东北侧方式1潮流计算^[2]表明, 在绥中电厂开2台800 MW机组时, 换流站考虑新增1台126 Mvar并联电容器补偿, 东北侧共投入12组滤波器, 总补偿容量达到1 512 Mvar。绥中电厂功率因数如果按0.92考虑, 则2台800 MW机组向换流站提供约500 Mvar无功。高岭换流站母线电压527 kV, 沙河营变母线电压520 kV。如果高岭-沙河营1回线路检修, 高岭换流站母线电压降下降到508 kV。如果绥中800 MW机组功率因数按0.95考虑, 则绥中电厂可向换流站提供约340 Mvar无功。换流站投入12组交流滤波器(共1 512 Mvar), 并投入沙河营变1组60 Mvar低容后, 换流站母线电压510 kV。

如果绥中800 MW机组功率因数按0.95考虑, 换流站投入13组交流滤波器(共1 638 Mvar), 并投入沙河营变1组60 Mvar低容后, 换流站母线电压522 kV。

若高沙1回线路退出, 则换流站母线电压下降较多, 仅为491 kV。此时可增加绥中电厂无功出力(功率因数0.92), 高岭站母线电压可提高到527 kV。或在高沙1回线检修时, 适当限制高岭直流输送功率, 以提高高岭换流站母线电压水平。

东北侧方式2潮流计算表明, 在绥中电厂开1台800 MW机组时, 换流站东北侧共投入13组滤波器, 总补偿容量达到1 638 Mvar。绥中电厂功率因数按0.92考虑, 则1台800 MW机组向换流站提供约250 Mvar无功。高岭换流站母线电压518 kV。该方式下, 高沙线路重载, 每回500 kV线路潮流约1 030 MW。此时换流站交流滤波器全部投入, 高岭换流站母线电压偏低。如果发生高沙1回线退出, 则高岭换流站母线电压下降较多, 已低于换流站母线电压变化范围。建议在高沙1回线检修时, 限制高岭直流输送功率。

同理按照方式1和方式2计算华北侧潮流计算^[2], 结果发现多种情况下系统电压水平与正常接线方式相差不大, 滤波器的型式和数量均能够满足高岭换流站满功率运行的要求。

综上, 绥中2台1 000 MW机组改接华北侧后,

高岭换流站东北侧与交流系统功率交换增加, 高岭换流站母线电压较低, 如果考虑绥中电厂改接后高岭换流站东北侧仅增加1组126 Mvar并联电容器, 绥中电厂剩余2台800 MW机组可增加无功出力提供部分换流站所需无功(功率因数0.92)。如果发电机功率因数为0.95, 则正常接线时换流站母线电压偏低, 来自绥中电厂的容性无功提供减少。在高沙1回线检修时, 换流站需要限制输送功率。为满足高岭直流满功率运行的要求, 需在高岭换流站东北侧新增2组126 Mvar的并联电容器。因东北侧交流滤波器场空间限制, 两组电容器并联后采用同一台断路器接入第一大组, 如图1所示。

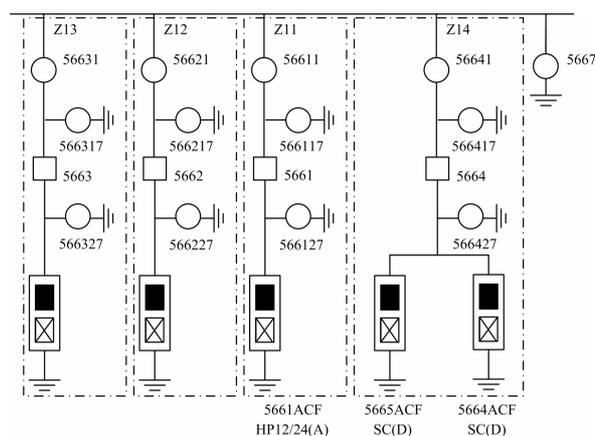


图1 新增Z14小组滤波器结构图

Fig. 1 New increase filter structure diagram

2 换流站无功控制策略及新增并联SC电容器控制方法

绥中电厂改接华北后, 高岭背靠背直流工程的无功控制配置下列功能(不同功能具有不同的优先级, 按优先级由高到底^[6], 共5个级别)。

(1) Q_control 策略

换流站采用Q_control策略时, 如果无功功率交换超过设定的限制值, 那么Q_control会发出命令, 投入或切出一个滤波器或电容器组。为避免无功小组的频繁投切操作, 允许实际无功交换与计划交换之间存在一定的偏差, 该偏差值至少应大于最大无功小组出力的一半, 对于东北侧, 实际无功交换与计划交换的偏差值, 即无功投切死区考虑为

$$K \times (Q_{filemax} / 2) = 1.6 \times (122.6 / 2) \approx 98 \text{ Mvar} \quad (9)$$

考虑避免无功小组频繁投切的需要, 无功投切死区定为102 Mvar。因此有(死区取整后):

$$\begin{aligned} \Delta Q &> Q_{ref} + 102 \text{ Mvar} \\ \Delta Q &< Q_{ref} - 102 \text{ Mvar} \end{aligned} \quad (10)$$

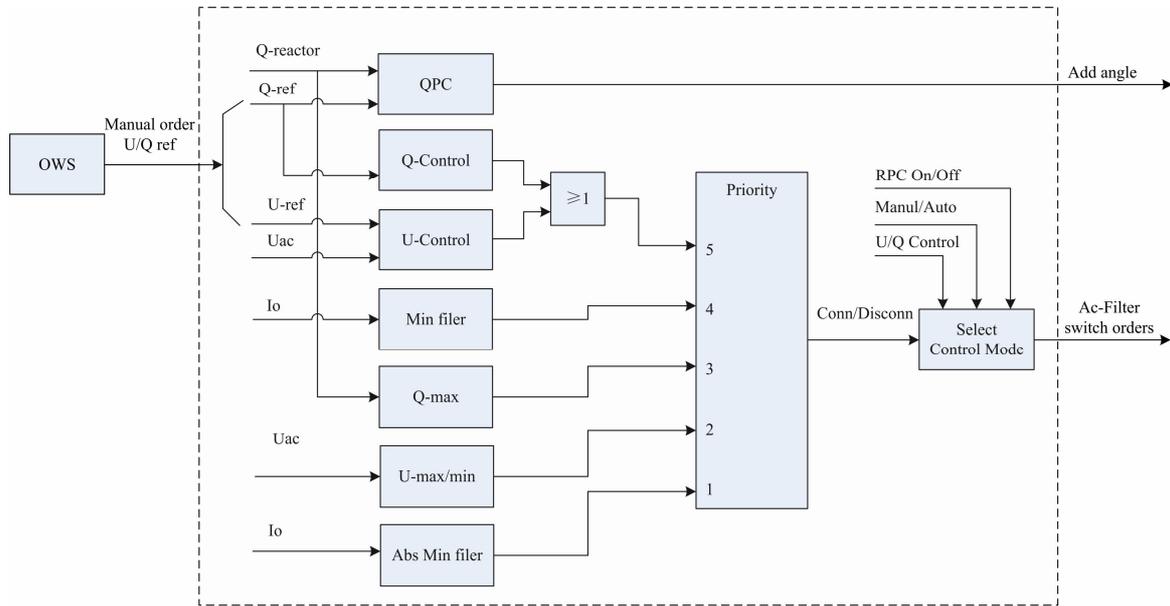


图 2 无功控制功能概况图

Fig. 2 Function of reactive power control

东北侧新增滤波器小组为 2×126 Mvar，两个并联电容器分支采用一个开关接入大组中。因此在无功控制中作为一个元件。该小组在滤波器投切顺序中最后一组投入、最先退出。由于小组容量远大于其他小组，在该小组投入/退出时的无功死区调整为 200 Mvar，其他小组仍为 102 Mvar 不变。

东北侧交流滤波器扩建前配置三种类型 Type A、B、C，考虑到新增小组的特殊性，设计考虑增加类型 D，方便实现最后投入，最先退出的要求，具体如表 3 所示。

表 3 东北侧交流滤波器配置

Table 3 Filter configuration of northeast side AC

类型	数量	容量
Type A	5 组	HP12/24 滤波器，每组容量分别为 126 Mvar
Type B	3 组	HP3 滤波器，容量为 126 Mvar
Type C	3 组	SC 并联电容器；容量为 126 Mvar
Type D	1 组	双 SC 并联电容器；容量为 252 Mvar

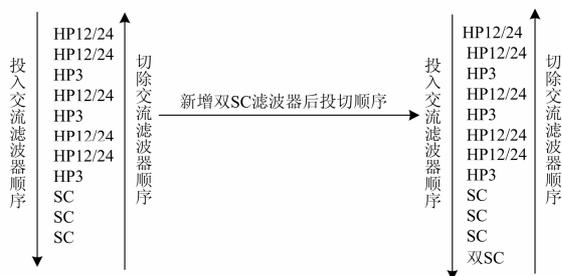


图 3 东北侧新增双 SC 滤波器前后滤波器投切顺序

Fig. 3 Order of filters input and back

设计考虑无功死区整定值在无功选择逻辑选择类型 D 时，实时修改死区整定值为 200 Mvar，同时上报事件提醒运行人员死区改变。只有选择逻辑退出选 D 时，才会返回原死区值。

2015 年 9 月 20 日到 21 日，在高岭换流站对东北侧新增加双 SC 滤波器做了如下系统试验。

1) SC 电容器和并联双 SC 电容器透切对交流电压的影响。

在选相合闸装置工作正常时，在四个换流单元全部闭锁和全部解锁(直流输送功率为 1 000 MW，四单元协调均为功率模式)两种情况下，手动透切新增的并联双 SC 电容器和常规的 SC 滤波器查看对交流电压的影响。

表 4 滤波器头投切对交流电压的影响比较

Table 4 Effect of AC voltage when the filter is input

运行工况	投入前电压	投入后电压	电压变化率
四个单元全部闭锁，投入单 SC 滤波器	536.3 kV	541.2 kV	4.9 kV
四个单元全部解锁，投入单 SC 滤波器	533.13 kV	537.3 kV	4.2 kV
四个单元全部闭锁，投入双 SC 滤波器	536.3 kV	545.5 kV	9.2 kV
四个单元全部解锁，投入双 SC 滤波器	533.1 kV	540.2 kV	7.1 kV

2) 直流功率从最低升至额定功率 3 000 MW，和直流功率从额定功率降至最低功率，并联双 SC 电容器透切顺序的正确性。对于华北侧，投切死区

值设为

$$K \times (Q_{\text{filemax}} / 2) = 1.6 \times (138 / 2) \doteq 110 \text{ Mvar} \quad (11)$$

因此有(死区取整后):

$$\begin{aligned} \Delta Q &> Q_{\text{ref}} + 110 \text{ Mvar} \\ \Delta Q &< Q_{\text{ref}} - 110 \text{ Mvar} \end{aligned} \quad (12)$$

图 4 和图 5 中 FLTDBW#11 表示并联 SC 电容器状态。通过上两图波形分析, 新增滤波器满足最后投入最先切除的透切策略。

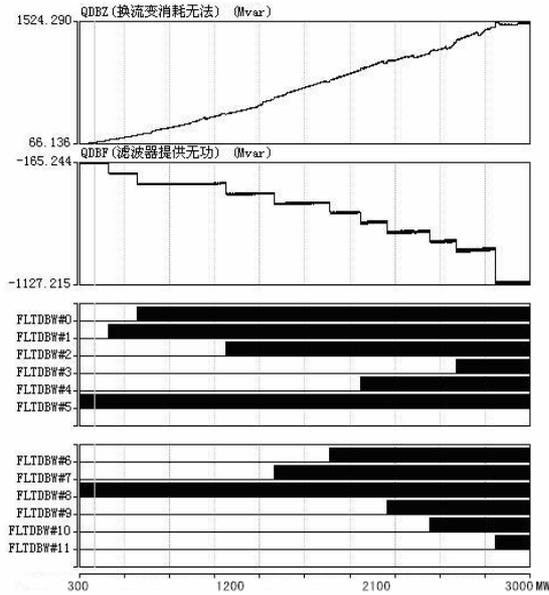


图 4 东北侧滤波器投入顺序

Fig. 4 Input sequence of northeast AC side filters

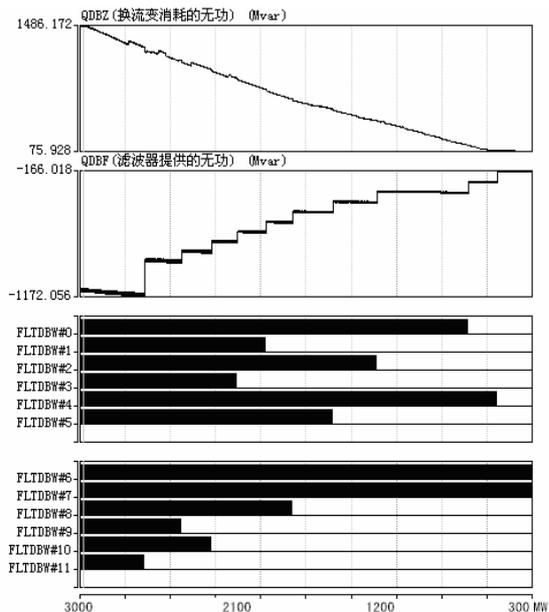


图 5 东北侧滤波器切除顺序

Fig. 5 Removal sequence of northeast AC side filters

为了避免频繁的投切操作, 系统还提供了一个限制频繁投切的功能, 它是自动投切滤波器/并联电容器组控制的一部分。滤波器/并联电容器组的“投一切”或“切一投”操作之间直流功率变化的滞后量应高于 50 MW。

绥中电厂改接华北后, 高岭背靠背直流工程东北侧和华北侧均采用 Q_control 策略, 无功控制参考值均采用 0 Mvar。

(2) U_control 策略

换流站采用 U_control 策略时, 如果换流母线电压超过设定的限制值^[7], 那么 U_control 会发出命令, 投入或切出一个滤波器或并联电容器组。东北侧电压控制的死区定为 5 kV, 控制目标为 525 kV; 华北侧的电压控制的死区为 8 kV, 控制目标 525 kV。

(3) 交流母线电压限制

交流母线电压限制的最大限制如表 5 所示。

表 5 交流母线电压限制的最大限制值

Table 5 Maximum limiting value of AC bus voltage		
	东北侧	华北侧
要求分组切除的最大电压(必切)	550 kV	550 kV
限制分组投入的最大电压(禁投)	540 kV	540 kV
限制分组切除的最小电压(禁切)	515 kV	518 kV
要求分组投入的最小电压(必投)	510 kV	510 kV

(4) 最小滤波器和绝对最小滤波器控制

根据交流滤波器设计确定的满足滤波性能和滤波器定值要求的最小滤波器要求^[8-9], 无功控制系统投入相应类型的交流滤波器组。

(5) 各种控制策略的应用原则

整流侧与逆变侧的换流站根据既定的无功控制策略, 结合系统提供/吸收的无功能力, 按无功交换限制以及滤波性能要求控制交流滤波器、并联电容器以及低压电抗器等无功补偿装置的投切操作, 并结合电力系统运行方式条件增加 SSR(频率次同步振荡)等附加功能^[10-11]对无功控制进行合理优化。

4 总结

本文对辽宁绥中电厂改接到高岭背靠背换流站华北侧后的无功控制的原理进行了详细的介绍, 对换流站的无功控制平衡进行了计算和分析, 对东北侧新加的两组 SC 并联电容器共用一个断路器的独特设计提出了控制策略, 并通过现场试验验证了控制方案的可行性, 为高岭背靠背换流站大负荷运行提供了安全保障, 为以后该特殊类型的滤波器的在其他换流站的使用提供了应用经验。

参考文献

- [1] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 一种新型三取二装置及配置策略在高岭背靠背扩建工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 121-126.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. A new device with "selecting 2 from 3" logic and its configuration strategy applied in Gaoling back-to-back II project[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 121-126.
- [2] C026-CT-SJ-03 辽宁高岭背靠背直流输电工程主回路参数[S].
C026-CT-SJ-03 the main circuit parameters of Liaoning Gaoling back to back converter station transmission project[S]
- [3] C071-11-SJ-133 辽宁绥中电厂改接高岭换流站华北侧工程成套设计技术方案[S].
C071-11-SJ-133 the technical scheme of Liaoning Suizhong power plant is connected to the north side AC of Gaoling back to back converter station[S].
- [4] XJ-HVDC/P-0005/ED4.341 辽宁高岭背靠背直流输电工程极控系统技术规范书[S].
XJ-HVDC/P-0005/ED4.341 Liaoning Gaoling back to back converter station transmission project C/P design specification[S].
- [5] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 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.
ZHANG Wang, HAO Junfang, CAO Sen, et al. Design of reactive power control for HVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 72-76.
- [7] 聂永辉, 李天云, 刘凤兰, 等. 基于非线性内点理论交直流系统无功优化新模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 35-40.
NIE Yonghui, LI Tianyun, LIU Fenglan, et al. A new AC-DC reactive optimal power flow model based on nonlinear interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 35-40.
- [8] 张荫永, 曹继丰. 高压直流输电换流站无功控制系统分析[J]. 电力设备, 2008, 9(4): 59-63.
ZHANG Yinyong, CAO Jifeng. Analysis of reactive power control system for HVDC power transmission converter station[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(4): 59-63.
- [9] 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.
ZHANG Xiaohu, CAO Guoyun, CHEN Chen. Proposal on reactive power control of hvdc system during low power transmission[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 118-122.
- [10] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [11] 顾威, 李兴源, 陈建国, 等. 基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 107-111.
GU Wei, LI Xingyuan, CHEN Jianguo, et al. Additional control design of SVC for mitigating subsynchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 107-111.

收稿日期: 2015-09-29; 修回日期: 2016-01-25

作者简介:

王亚涛(1981-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电直流控制系统研究。E-mail: wangyatao2002@163.com

(编辑 姜新丽)