

特高压交直流混合电网协调电压控制策略及仿真研究

陈江澜¹, 张蓓², 兰强², 李建², 路轶², 苟晓毅³,
肖岚³, 王彬¹, 郭庆来¹, 孙宏斌¹

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084; 2. 四川省电力公司调度控制中心, 四川 成都 610041;
3. 四川省电力公司信息通信公司, 四川 成都 610041)

摘要: 特高压交直流混合电网的电压运行特性对 AVC 系统的建设提出了新的需求。首先分析了 AVC 系统需应对的当交直流系统分别发生不同时间常数扰动后的四种工况, 提出了增加直流换流站母线协调电压约束、自适应地调整 AVC 系统中母线电压限值、调节优化计算的时刻以及控制目标等手段的协调控制策略。基于 AVC 仿真平台和 IEEE39 节点标准算例系统的连续仿真, 通过比较当交流和直流系统分别发生方式变更时, 采用协调策略前后的系统响应, 验证了协调策略可以减少无功补偿设备不合理的投切。提出的协调策略将在四川电网得以实际应用。

关键词: 协调控制; 特高压直流; 自动电压控制; 仿真平台; 四川电网

Research on strategy and simulation of coordinated automatic voltage control for UHVDC/AC hybrid grid

CHEN Jiang-lan¹, ZHANG Pei², LAN Qiang², LI Jian², LU Yi², GOU Xiao-yi³, XIAO Lan³, WANG Bin¹,
GUO Qing-lai¹, SUN Hong-bin¹

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Dispatching and Control Center of Sichuan Grid, Chengdu 610041, China;
3. Information and Communication Company of Sichuan Grid, Chengdu 610041, China)

Abstract: The characteristics of the UHVDC/AC hybrid grid have put forward new demands on the construction of AVC system. This paper firstly analyzes four operating modes which AVC system needs to cope with when the disturbances occur in the AC grid and the UHVDC grid respectively with different time constants. According to that, the coordinated control strategy including adding the coordinated bus voltage constraints of the converter station, adaptively refreshing the voltage constraints in the AVC system, adjusting the optimal control calculation time as well as control objectives is given. On basis of the continuous AVC simulations on standard IEEE 39 example system and by comparing the system response before and after the coordinated strategy is adopted when the AC and UHVDC grids' operation modes have changed, the coordinated control strategy will reduce the unreasonable switching times of var compensation equipment is verified. The proposed coordinated control strategy will be applied in Sichuan grid.

This work is supported by National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (No. 2013CB228203), National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51025725), and National Natural Science Foundation of China (No. 51277105).

Key words: coordinated control; UHVDC; AVC; simulation platform; Sichuan Grid

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)11-0021-07

0 引言

我国特高压直流系统相继投运对电网的运行与控制提出了新的要求^[1]。其中, 如何应对特高压直流系统接入给交流电网调压带来的影响是一项全新

课题。当前, 采用分级分区和多层级间协调互动控制模式的自动电压控制系统 (Automatic Voltage Control, AVC) 已在国内外得到了广泛的应用^[2-3], 但目前 AVC 系统中尚未纳入对特高压直流系统的协调。

文献[4-7]对直流换流站内的无功补偿设备的配置方案以及自动投切的准则进行了研究, 但此类控制仅依据直流系统换流站的本地信息进行控制, 缺乏与邻近交流电网的信息交互。文献[8]设计出了综

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2013CB228203); 国家杰出青年科学基金 (51025725); 国家自然科学基金 (51277105)

合调控直流系统近区电网无功资源的协调电压控制模式和系统架构,但需基于进一步的仿真,对协调电压控制策略的合理性和有效性作出验证。

文献[9-11]采用电磁-机电混合仿真研究交直流系统的交互作用,该类型的仿真可得到与真实工况接近的直流暂态过程,但在区域级的电压控制的场景中,直流系统暂态一般可以认为在秒级时间内结束,而常规 AVC 指令下发周期一般为数分钟,可以认为当直流暂态发生后,新一轮 AVC 控制策略生成时,直流系统近区电网已趋于新的稳态。故采用基于稳态潮流的仿真系统研究特高压交直流混合电网的协调电压控制策略是适用的。本文将在标准算例系统上搭建 AVC 仿真平台,模拟交直流混合电网无功电压调控过程中可能出现不协调工况,并验证改进后的调压策略的效果,为实际的协调电压控制系统的建设提供参考。

1 交直流混合电网无功电压运行控制特性分析

1.1 特高压直流系统无功电压特性

直流换流阀消耗的无功与其传输有功大致呈正相关。换流站与交流电网交换无功特性可以由式(1)表示^[12]。

$$Q_{ac} = Q_{dc} - Q_{total} \quad (1)$$

式中: Q_{dc} 为换流阀无功消耗; Q_{ac} 为直流系统与交流系统交换的不平衡无功; Q_{total} 为换流站内无功补偿设备产生的总的容性无功。

当特高压直流系统处于常规的计划传输功率调整时,其传输的有功功率往往在小时级的时间常数时间段内缓慢变化,从而导致换流阀消耗的无功亦随着其传输有功值相应缓慢变化,继而引发换流站内自动投切无功补偿设备。现阶段普遍采用的投切模式是根据直流系统所接入的交流系统的强弱选择为定换流站交流母线电压限值或者不平衡无功限值控制模式,其控制目标都是避免因交直流系统间交换无功过大导致对其近区的交流系统产生较大的冲击。

当直流系统发生系统启、停或由于故障闭锁时,或将引发系统安稳装置动作,其暂态过程一般于数秒内结束,随后直流近区电网将过渡到新的稳态。

1.2 交直流混合电网无功电压运行特性

当特高压直流系统接入交流电网后,常规 AVC 调压时将面对如下典型工况,依照扰动源分为典型的两大类,一类是直流系统运行方式发生较大调整 1)、2); 另一类是交流系统运行方式发生较大调整 3)、4)。

1) 直流系统传输有功计划内调整,时间常数在小时级。

2) 直流系统发生紧急状态(闭锁以及起、停等),时间常数在秒级。

3) 特高压直流电网近区交流系统无功负荷正常波动(例如系统负荷按运行计划的增减),时间常数在数分钟级。

4) 特高压直流电网近区的交流系统发生故障,或者随机的短时无功扰动,时间常数在秒级。

1.3 常规 AVC 控制策略简析

常规的 AVC 主要控制流程如图 1 所示。

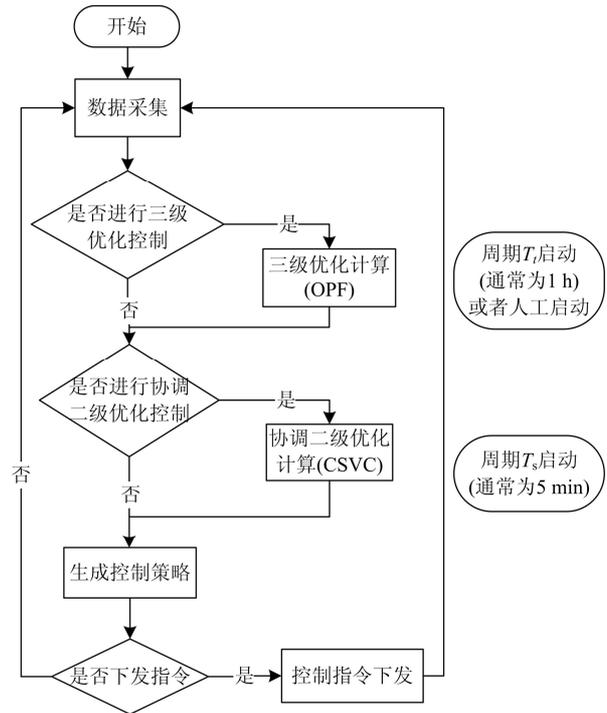


图 1 常规 AVC 控制流程

Fig. 1 Control flow of normal AVC system

三级优化电压控制模式是一种得以普遍应用的大区电网电压控制模式^[13-14]。其中三级优化计算以 T_t 为周期定时启动(通常为 1 h),求解优化问题:

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta u} f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ & \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \geq 0, \\ & \quad \|\Delta \mathbf{u}\| \leq \Delta \mathbf{u}^{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \mathbf{u} 为控制变量; \mathbf{x} 为状态变量; $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为不等式约束,其中包含有监视母线电压不越限等条件, $\Delta \mathbf{u}^{\max}$ 为最大调节步长; f 通常选取为系统网损函数。求得满足一定约束条件下使得网损最小的控制量 $\Delta \mathbf{u}$, 控制后的状态变量优化设定值为 \mathbf{x}^{ref} 。

协调二级优化以 T_s 为周期启动(一般周期设置

为 5 min), 求解规划问题:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \mathbf{u}} & \|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_p^{\text{ref}}\|^2 + f_s(\mathbf{x}_p, \mathbf{u}) \\ \text{s.t.} & \mathbf{g}(\mathbf{x}_p) \geq \mathbf{0}, \\ & \|\Delta \mathbf{u}\| \leq \Delta \mathbf{u}^{\text{max}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \mathbf{x}_p 为区域中枢母线节点电压; $\mathbf{x}_p^{\text{ref}}$ 为中枢母线优化设定值, 由三级电压控制模块给出; f_s 为利用多余控制自由度所增加的安全相关的控制目标^[13]。

特高压直流系统接入电网可能导致接入电网潮流分布在短时间内发生较大改变, 而常规 AVC 的三级与二级电压控制计算为周期启动, 将不能适应直流系统接入带来的影响。同时直流系统换流站依照一定准则控制其自有的无功补偿设备投切, 而常规 AVC 系统并未纳入针对直流系统自身无功控制的协调。因此, 需要在常规 AVC 系统上进行改进, 以适应特高压直流系统接入的调压需求^[8], 具体针对不同工况的协调策略分析如下。

2 交直流混合电网协调 AVC 策略分析

2.1 交直流混合电网协调 AVC 控制策略

针对 1) 中描述的工况, 由于直流系统方式变更往往会导致交流系统潮流分布产生较大改变, 故将直流系统运行方式划分为若干空间:

$$\Omega_i = \bigcup_{j=1}^k w_{ij} \quad (4)$$

式中, Ω_i 为第 i 个直流系统的运行空间, 它可由该直流系统的实际工况划分为若干子空间 w_{ij} 。当直流系统方式处于某一子空间时, 其近区交流电网二级协调电压控制母线的约束限值可以通过预先的安全稳定计算确定, 其中, \underline{V}_{si} , \bar{V}_{si} 分别为电压下限及电压上限。

当直流系统 i 运行的子空间发生切换时, 认作此时发生了一个事件 e_{ik} , 其下角标 k 表示为直流系统 i 第 k 次运行状态空间切换。依照式(5):

$$\begin{aligned} w_{ij} & \rightarrow w_{ij}' \\ \underline{V}_{si}, \bar{V}_{si} & \rightarrow \underline{V}_{si}', \bar{V}_{si}' \end{aligned} \quad (5)$$

二级协调控制模型(3)中相应的母线限值也将随之切换。

此时由于交直流运行方式都发生了较大的调整, 全网的优化运行点亦可能发生了相应的改变, 故应自适应地重启三级优化和二级协调优化控制计算, 启动的周期将变为

$$T_i \rightarrow T_i(e_{ik}); T_s \rightarrow T_s(e_{ik}) \quad (6)$$

即交直流混合电网协调 AVC 将在常规 AVC 的定时启动控制计算的基础上, 加入事件驱动计算机制。

针对 2) 中描述的工况, 可以认为在数秒的时间内特高压直流系统引发的暂态已经结束, 其近区的交流电网进入新的稳态。除了按照式(5)自动调整电压运行限值以及计算周期, 直流近区交流电网很有可能已经出现某些母线电压越限的情况, 此时, 交直流混合电网协调 AVC 的控制目标也应自适应地改变, 式(2)中的目标函数将按式(7)改变:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \rightarrow F(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (7)$$

式中, $F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 中含有校正电压越限的控制目标, 将近区交流电网电压尽可能控回安全限值范围以内。

针对 3) 中的工况, 式(3)中的计算模型考虑加入直流系统换流站无功补偿设备投切的限值条件; 在式(3)中考虑加入以下协调约束:

$$\underline{V}_{DCi} \leq V_{DCi} \leq \bar{V}_{DCi} \quad (8)$$

式中: V_{DCi} 为第 i 个直流系统换流站交流母线电压; \underline{V}_{DCi} , \bar{V}_{DCi} 分别为其下限值和上限值。当直流系统的无功补偿设备采用定交流母线电压控制模式时, \underline{V}_{DCi} , \bar{V}_{DCi} 就采用该电压限值。当采用不平衡无功限值控制模式时, 则采用该交流母线的安全电压限值。这样, 保证 AVC 系统在进行二级协调控制计算时, 产生的策略将充分调动交流系统的无功资源, 减少因交流系统方式变更而引起的换流站内无功补偿设备不必要的动作。并按照式(6)自适应地调整 AVC 的计算控制周期。

针对 4) 中的工况, 如果交流系统对直流系统的扰动足够大, 有可能导致直流系统内部控制器动作(例如调整换流阀触发角的大小, 时间在毫秒级)。首先交直流混合电网协调 AVC 系统转入式(7)的校正控制模式, 目标是将监视母线电压调整到安全限值以内。过渡到新的稳态以后, 进入无功置换环节。例如, 在短时间内, 直流系统可通过调整触发角短时吸收交流系统注入的过量无功, 在暂态发生后, 通过 AVC 对交流系统无功资源的调控, 置换出直流系统多吸收的这部分无功, 这样可以保证留有直流系统快速吸收过量无功的裕度。

2.2 交直流混合电网协调 AVC 控制流程

依据前文分析结果, 特高压交直流混合电网协调 AVC 的基本控制流程设计如图 2。通过获取特高压直流近区电网关键设备状态信息, 然后判断当前交直流电网的运行状态, 生成不同状态下的协调策略。通过增加直流换流站母线协调电压约束、调整

AVC 系统中母线的电压限值、自适应调节优化计算的时刻以及控制目标等手段, 实现交直流系统的协调电压控制。

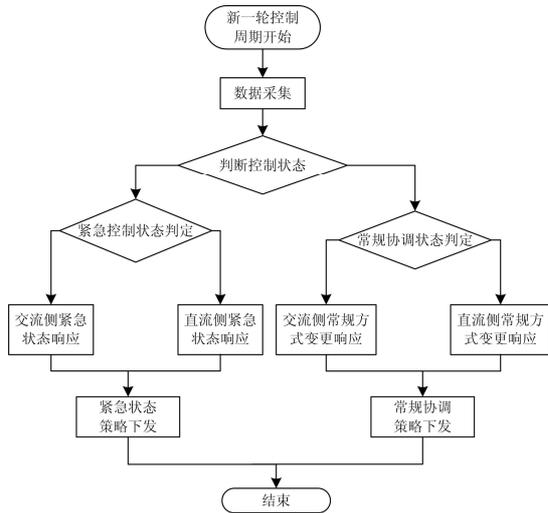


图 2 特高压交直流混合电网协调 AVC 系统控制流程
Fig. 2 Control flow of coordinated AVC system for hybrid UHVDC/AC grid

3 交直流混合电网协调 AVC 仿真分析

本节将基于 AVC 仿真平台, 研究当电网运行方式变更时, 采用交直流混合电网协调控制策略前后 AVC 的控制效果的比较。

3.1 AVC 仿真平台简介

AVC 仿真平台能从某一初始断面数据启动, 通过连续计算潮流, 并且模拟系统中设备的动作, 例如容抗器投切或者发电机组的无功出力调整, 来模拟 AVC 系统连续控制对电网的影响, 验证控制策略的有效性^[15]。

3.2 仿真系统搭建

本文对 IEEE39 节点标准电力系统进行改造, 在此基础上搭建了 AVC 仿真系统, 系统结构见图 3。仿真系统有着与实际 AVC 系统相同的三级和二级计算模块, 三级控制计算以网损最小为目标计算各中枢节点优化设定值; 二级控制计算模块计算出校正中枢节点电压偏差该区域内控制发电机端电压设定值并下达控制指令, 同时通过连续的潮流计算, 来模拟实际电网中一级电压控制层面中通过调整机端励磁调节发电机无功出力的过程。

首先通过分区算法将标准算例系统进行软分区^[16], 以节点 2、3、18、17、25、26、27、28、29、30、37、38 节点组成的软分区为研究对象, 该区域

内拥有可调发电机节点 30、37、38; 中枢母线节点 3、28; 27 号节点模拟特高压直流换流站, 传输有功为恒定值, 依照定换流站交流母线电压限值自动投切站内的无功补偿设备。仿真过程中, 直流系统传输的有功功率保持恒定值, 假定其他控制条件不变, 换流阀自身消耗的无功也将是大致不变的。此时影响交直流间交换无功最大的是换流站内无功补偿设备的分组投切。

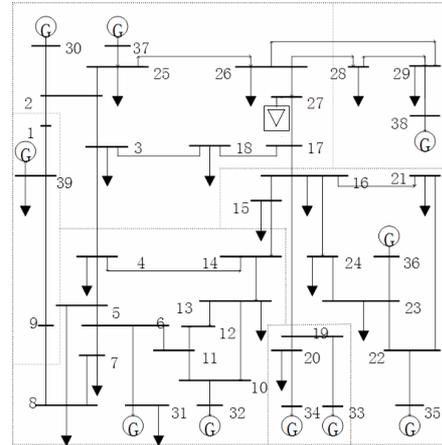


图 3 IEEE39 交直流混合仿真系统
Fig. 3 IEEE39 hybrid AC/DC simulation system

本轮仿真算例将模拟不同的交直流混合电网运行方式下, 无 AVC 控制、采用常规 AVC 控制, 以及采用交直流混合电网协调 AVC 策略后电网的响应。

3.3 交流运行方式变更时协调 AVC 策略仿真

本轮仿真算例将模拟当交流系统运行方式发生较大改变时, 不同控制条件下的电网响应。

模拟 18 号节点的有功与无功线性增长, 如图 4 所示, 在 100 个仿真点数内, 节点下网有功从 300 MW 线性增长到 700 MW, 无功从 150 Mvar 线性增长到 350 Mvar。

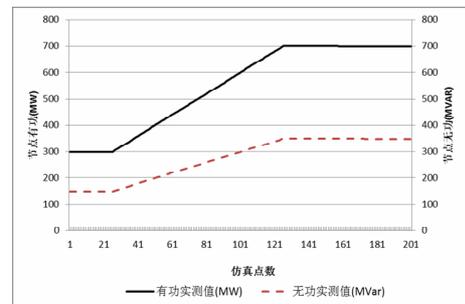


图 4 No. 18 负荷节点消耗有功与无功
Fig. 4 Active and reactive power consumed by load at No. 18 node

以不同的线型展示了系统处于无 AVC 控制, 常规 AVC 控制以及采用了交直流混合电网协调 AVC 策略后的运行状态变化曲线。

模拟换流站的 27 号节点下网无功曲线如图 5, 节点电压曲线如图 6。

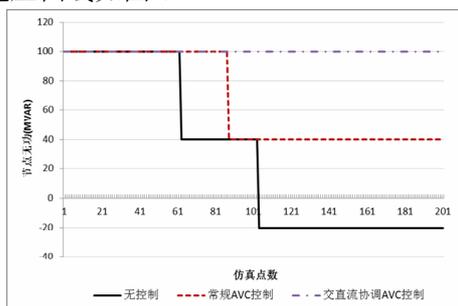


图 5 No. 27 换流站节点下网无功曲线

Fig. 5 Reactive power curve consumed by converter station at No.27 node

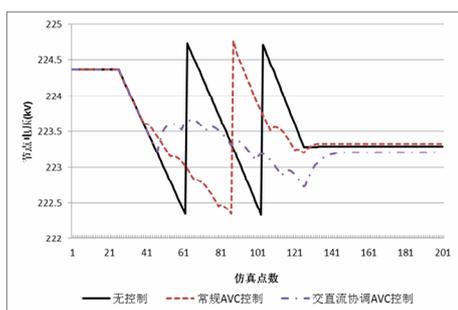


图 6 No. 27 换流站节点电压曲线

Fig. 6 Bus voltage curve of converter station at No.27 node

图 7 给出了不同控制条件下, 中枢母线 No.28 的电压变化曲线。图 8 给出了不同控制条件下, 37 机和 38 机无功总和的变化曲线。

无 AVC 控制时, 由于换流站交流母线电压搭下限, 站内先后投入了两组每组容量为 60 MVA 无功补偿设备, 中枢母线节点 No.28 的电压即刻上跳了 0.7 kV。

处于常规 AVC 控制时, 中枢母线电压满足在控制死区范围内, 但由于换流站交流母线电压依然搭

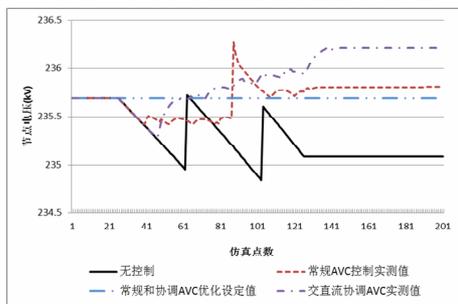


图 7 No. 28 中枢母线节点电压曲线

Fig. 7 Pilot bus voltage curve at No.28 node

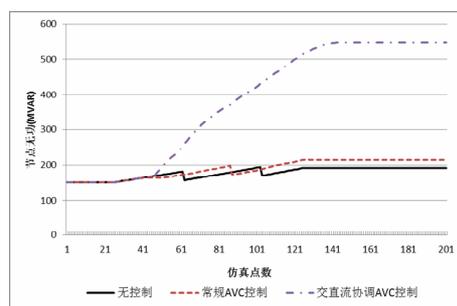


图 8 发电机无功出力曲线

Fig. 8 Reactive power curve of generator

下限, 换流站需要投入一组 60 Mvar 的补偿电容。并且当换流站投入电容器后, 中枢母线电压超过优化设定值, 使得发电机无功出力降低。

采用交直流混合电网协调 AVC 策略后, 换流站投切无功补偿设备所依据的交流母线电压限值将作为例如式(8)中的协调约束加入常规 AVC 二级计算模型中。在仿真过程中, 由于通过该区域内控制发电机的调节作用, 换流站母线电压始终保证在调节死区范围之内, 不需要投入电容器。

仿真结果表明, 考虑直流协调约束的 CSVC 可以考虑直流侧的定电压运行约束, 充分发挥交流侧的发电机调节能力来抑制交流侧运行方式的变化对直流侧运行方式的影响, 避免换流站内无功补偿设备发生不合理的投切。

3.4 直流运行方式变更时协调 AVC 策略仿真

本轮仿真算例将模拟当直流有功输电持续增长时, 需要换流站投入无功补偿设备下的电网响应。

图 9 所示给出了换流站内无功电压变化曲线, 换流站投入一组无功补偿设备, 投入后换流站母线电压即刻上跳了 1.3 kV。

此时, 交直流混合电网协调 AVC 自适应调整优化计算周期, 重新启动一次全局无功优化计算, 计算出中枢节点的电压设定值从 235.7 kV 改变为 234.3 kV, 如图 10 中双点划线所示。这样可以避免

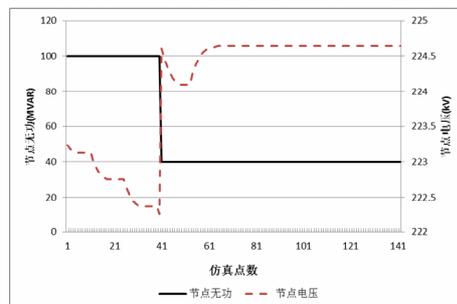


图 9 No. 27 换流站节点下网无功与节点电压曲线

Fig. 9 Reactive power consumed by converter station and bus voltage curve at No.27 node

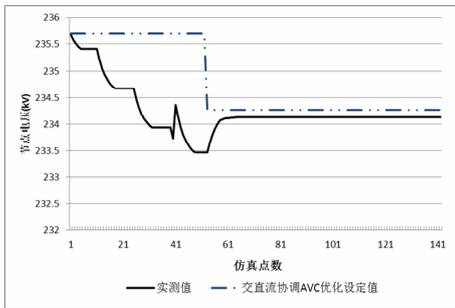


图 10 No. 28 中枢节点电压曲线

Fig. 10 Pilot bus voltage curve at No.28 node

因要维系中枢母线节点电压在原优化设定值时，控制发电机持续增加无功出力，使得 No.27 换流站节点交流母线电压达上限，将有可能使得刚投入的换流站无功补偿设备又被切除。

No.37 和 No.38 发电机节点的无功出力如图 11，在 No.27 换流站节点投入一组无功补偿设备后，该区域内的控制发电机的无功出力将相应回落，并在下一轮 AVC 控制计算开始后，这些机组的无功出力没有出现大幅的增长。

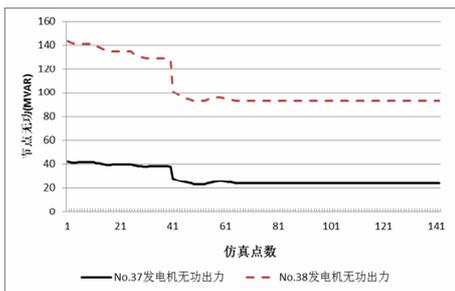


图 11 No. 37 和 No. 38 发电机无功出力曲线

Fig. 11 Reactive power curve of generator at No.37 and No.38 node

仿真结果表明，交流侧 AVC 可根据直流系统运行方式变更自适应调整控制计算周期，保证 AVC 控制计算的结果与当前电网工况相匹配，避免了换流站内无功补偿设备发生不合理的投切。

4 结论

本文首先分析了直流系统接入交流电网后，出现的四种典型的调压场景，并针对不同的场景设计了相应的协调策略，并在此基础上设计了交直流混合电网协调 AVC 的控制流程。基于 AVC 仿真平台，分别模拟了当交流系统和直流系统发生方式变更时，采用常规 AVC 与交直流混合电网协调 AVC 策略后电网响应的比较，仿真研究表明了调压策略的有效性，基于本文研究的协调电压控制策略将在四川电网在建特高压交直流混合电压控制系统中得以

实施。

参考文献

[1] 王建明, 孙华东, 张健, 等. 锦屏—苏南特高压直流投运后电网的稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 66-70.
WANG Jian-ming, SUN Hua-dong, ZHANG Jian, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Jinping to Sunan[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 66-70.

[2] 王彬, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 双向互动省地协调电压控制系统中的协调约束生成技术[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 66-71.
WANG Bin, GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, et al. Automation of electric power systems coordinated constraint generating technology for bidirectional interaction based provincial coordinated voltage control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 66-71.

[3] 王彬, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 双向互动的省地协调电压控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 53-57.
WANG Bin, GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, et al. Bidirectional-interaction based voltage control system by coordination between provincial and district power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 53-57.

[4] 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 Jun-fang, CAO Sen, et al. Design of reactive power control for HVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 72-76.

[5] 戴国安, 周君文, 王亚非. 特高压直流无功控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 48-51.
DAI Guo-an, ZHOU Jun-wen, WANG Ya-fei. Strategy of reactive power control on UHVDC[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 48-51.

[6] 邸弢, 李华强, 范锴. 基于奇异值分解和内点法的交直流系统无功优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 158-163.
DI Tao, LI Hua-qiang, FAN Pei. Reactive power optimization of AC/DC power system based on singular

- value decomposition and interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 158-163.
- [7] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [8] 苟晓毅, 肖岚, 兰强, 等. 特高压交直流混合电网无功电压特性与电压控制协调系统设计[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(4): 81-86.
GOU Xiao-yi, XIAO Lan, LAN Qiang, et al. The voltage characteristics of UHVDC/AC hybrid grid in Sichuan and the design of coordinated automatic voltage control system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(4): 81-86.
- [9] 熊红德, 钟庆, 杨煜, 等. 特高压直流输电换流站 SVC 与滤波器投切协调控制仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 144-148.
XIONG Hong-de, ZHONG Qing, YANG Yu, et al. Research on simulation of coordinated control between UHVDC converter station SVC and its reactive power compensation devices[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 144-148.
- [10] 周俊, 郭剑波, 胡涛, 等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
ZHOU Jun, GUO Jian-bo, HU Tao, et al. Digital/analog dynamic simulation for ± 500 kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [11] HU Tao, YIN Yong-hua, JIANG Wei-ping, et al. Study on method of digital/analog hybrid simulation for the ultra-high voltage grid[C] // Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on, 2008: 1-5.
- [12] 赵晔君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
ZHAO Wan-jun. HVDC engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [13] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 协调二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19-24.
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Study on coordinated secondary voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 19-24.
- [14] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83-87.
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Research and development of AVC system for power networks of Jiangsu Province[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 83-87.
- [15] 王彬. 多级控制中心无功电压协调优化控制[D]. 北京: 清华大学, 2011.
WANG Bin. A study on reactive power and voltage coordinated optimal control for multiple control centers[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [16] 孙宏斌, 张伯明, 郭庆来, 等. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 16-20.
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, GUO Qing-lai, et al. Design for global optimal voltage control system based on soft identification of secondary control zones[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 16-20.

收稿日期: 2013-08-27; 修回日期: 2013-10-23

作者简介:

陈江澜(1986-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向是电力系统无功电压控制; E-mail: chenjl04@mails.tsinghua.edu.cn

张蓓(1973-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 专责潮流和无功电压管理;

兰强(1985-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 专责调度自动化。