

同步调相机对直流逆变站运行特性的影响分析

张宁宇, 刘建坤, 周前, 汪成根

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:特高压直流换流站配置的无功补偿装置主要用于提供有功功率传输时消耗的无功功率, 因此其动态特性对交直流混联电网的电压稳定性、直流运行特性产生显著影响。基于直流逆变站的控制特性, 对交流电压大幅波动过程中同步调相机对直流逆变站的运行特性的影响进行深入分析, 揭示了同步调相机的无功出力特性以及逆变站电气量的响应特性, 并通过仿真算例进行了验证。该工作为多直流馈入电网中大容量同步调相机的接入奠定了理论基础。

关键词:特高压直流; 逆变站; 同步调相机; 运行特性

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)03-0017-04

我国能源分布及负荷发展极不平衡, 水力资源主要集中在西南数省, 煤炭资源主要集中在山西、陕西和内蒙西部, 而负荷主要集中在东部沿海地区, 因此远距离大容量输电势在必行。另一方面, 我国各大区和独立省网的互联已进入实施阶段, 利用直流输电作异步联网在技术上、经济上 and 安全性等方面的优势已在世界范围内得到证明。因此直流输电技术必将以其技术上和经济上的独特优势, 在远距离大容量输电和全国联网两方面对我国电力工业的发展起到十分重要的作用。我国已成为世界范围内直流输电应用前景最为广阔的国家。

常规直流换流站需要消耗大量的无功功率, 其主要靠换流站内静态无功补偿装置提供, 当系统出现大扰动时, 直流系统换流站吸收的无功功率可能显著增加, 同时无功补偿装置出力会大幅波动。可见直流馈入对受端系统电压稳定性影响, 主要取决于以逆变器和无功补偿装置为主要部件的逆变站综合动态无功特性^[1]。

目前世界上已有换流站的无功补偿设备主要有三大类: 电容器、动态无功装置和同步调相机。国内外关于电容器和静止无功补偿装置对交直流电网无功特性和电压稳定性的影响已有较多成果, 如文献[2]分析动态无功补偿装置对多馈入直流电网无功电压特性的影响; 文献[3]分析以直流逆变器和电容器为主要部件的直流逆变站动态无功特性。文献[4-6]分别针对多直流馈入电网情况下, 静止无功补偿器、静止同步补偿器等装置提升暂态电压稳定性的措施。相对于上述两类无功补偿装置, 同步调相机对于直流换流站无功电压特性影响的成果较少。文献[2]分析了电网发生短路故障后, 同步调相机对于电网恢复运行的作用。文献[7]从提升系统电压稳定性和电网输电能力、技术经济学等不同角度对调相机的选点和选型

进行了研究。但现有文献均未对考虑同步调相机的换流综合动态无功特性进行深入分析。

随着我国直流工程的不断建成投运, 尤其对于东部地区电网而言, 直流馈入容量不断增加, 受端交流电网相对逐渐变弱, 增加同步调相机成为改善电网电压稳定性, 提供电网运行经济性的有效措施。因此, 基于同步调相机的运行特性, 研究其对直流逆变站控制特性和无功电压特性的影响, 对于多馈入交直流混联电网的稳定运行有着迫切的需求。文中在直流逆变站准稳态模型的基础上, 建立了同步调相机的动态模型, 分析同步调相机的无功出力特性以及对电网电压的支撑特性, 并通过仿真算例进行了验证。

1 直流逆变站准稳态模型和控制配置

1.1 直流逆变站准稳态模型

直流逆变器是典型的非线性时变电路。在电力系统机电暂态仿真中, 通常采用如图1所示的准稳态模型描述交流基波分量与直流平直分量间的约束关系^[8,9]。

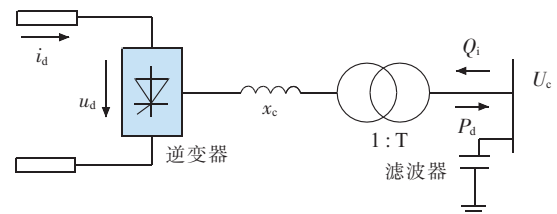


图1 逆变器准稳态模型

一个单桥6脉动逆变器的准稳态模型, 可采用如下表达式模拟:

$$u_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi T} U_c \cos\beta + \frac{3X_c}{\pi} i_d \quad (1)$$

$$P_d = u_d i_d \quad (2)$$

$$Q_i = P_d \tan\varphi \quad (3)$$

$$\cos\varphi = \frac{u_d}{u_{d0}} \quad (4)$$

$$\gamma = \beta - \mu \quad (5)$$

$$\mu = \beta - \arccos\left(\frac{\sqrt{2} i_d X_c T}{U} + \cos\beta\right) \quad (6)$$

式中： u_d, i_d 分别为直流电压和电流； u_{d0} 为无相控的理想空载电压； T, X_c 分别为换流变压器变比及漏抗； U_c 为逆变站高压母线电压； β, γ, μ 分别为逆变器出发超前角、熄弧角和换相角； P_d, Q_i, φ 分别为逆变器传输有功、无功消耗和功率因数角。从逆变器准稳态模型可以看出，交流系统对直流系统的影响，仅取决于逆变站高压母线电压幅值 U_c 这一电气参量。

1.2 直流逆变站控制配置

直流逆变站的基本控制配置及其特性如下：

(1) 定熄弧角控制。熄弧角是指从被换相的阀电流过零算起，到该阀重新被加上正向电压为止这段时间所对应的电角度。如果熄弧角太小，以致晶闸管来不及完全恢复其正向阻断能力，又重新加上正向电压，它就会重新自行导通，于是将发生倒换相过程，称之为换相失败。为避免换相失败，应尽量控制熄弧角处于较大范围内，但熄弧角增大后，将导致逆变器功率因素降低，使逆变器消耗的无功功率增大。根据实际工程经验，直流逆变器的熄弧角定值通常在 $15^\circ \sim 18^\circ$ 的范围内。

(2) 直流电流控制。根据电流裕度控制原则，逆变器也需装设电流调节器，不过逆变器电流调节器的整定值通常比整流器小 0.1 p.u. 。只有当整流侧直流电压大幅度降低或你鞭策直流电压大幅度升高时，才变为整流侧最小触发角控制，逆变侧定电流控制。

(3) 直流电压控制。逆变站采用定直流电压控制与定熄弧角控制相比，更有利于受端交流系统的电压稳定。另一方面，采用定电压控制时，由于在增大直流电压方向上往往需要留有一定的调节裕度，因而在额定工况下，这种控制方式保持的熄弧角比定熄弧角控制时要大。

(4) 低压限流控制。为了和整流侧低压限流控制的特性配合，保持电流裕度，逆变侧也需要设置低压限流控制，且其电压定值、电流定值、时间常数都必须密切与整流侧配合。

(5) 最大触发角限制。为了防止因调节器超调导致逆变器触发角太大，造成逆变器熄弧角太小而引起换相失败逆变器还需设置最大出发角限制，通常在 $150^\circ \sim 160^\circ$ 之间。

2 同步调相机

同步调相机是一种专用的无功功率发电机，实质上是空载运行的同步电动机，其主要用途是供给无功功率，改善功率因素，因此其无功功率调控与同步电

动机一样，也是通过改变励磁电流的大小。在过励磁运行时，向新系统供给感性无功功率，提高系统电压；在欠励磁运行时，从系统吸取感性无功功率，降低系统电压。当系统处于轻负荷运行时，需要将系统中某些发电机改为同步调相机，以吸收系统中多余的无功功率，以达到系统的无功平衡。

同步调相机的向量如图2所示。忽略损耗情况下，定子电流 i 全部为无功分量。在正常励磁情况下，励磁电动势 \dot{E}_0 与机端电压 \dot{U} 相等，即 $\dot{E}_0 = \dot{U}$ ，无功功率为0；过励情况下， $\dot{E}_0 > \dot{U}$ ， i 滞后 $\dot{E}_0 90^\circ$ ，调相机向电网发出感性无功功率，启动电容器补偿的作用；欠励情况下， $\dot{E}_0 < \dot{U}$ ， i 超前 $\dot{E}_0 90^\circ$ ，调相机向电网发出容性无功功率，启动电抗器补偿的作用。

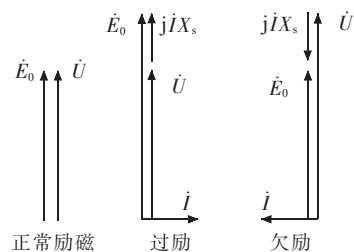


图2 同步调相机向量图

同步调相机的主要优点是可以连续调节无功功率的数值，但由于其主要部分和辅助系统都是旋转电机，有功功率损耗比较大，需要从网络中消耗其额定容量3%左右的有功功率，最大无功出力为额定出力的50%~65%，运行维护比电容器等无功源设备更高，且投资费用高。但其有利于提高系统的稳定性，尤其是对于多直流馈入混联电网。

在PSD-BPA软件中没有专门的调相机模型，可用电机模型MC、MF卡即可，但其潮流计算中调相机有功出力不应为0，应为负的很小值，以考虑定子上的有功损耗。在稳定计算中，由于调相机一般无原动机，故其动能(惯性常数)比普通发电机小。

3 考虑同步调相机的直流逆变站无功电压特性

在电力系统机电暂态仿真软件PSD-BPA暂态稳定程序中，以华东某特高压直流线路为例，建立如图3所示额定电压 $\pm 800 \text{ kV}$ 、额定电流 4 kA 、额定功率 7200 MW 、无功补偿容量为 4760 Mvar 的特高压首端系统，分析考虑同步调相机的逆变站动态无功特性。图中， Q_i 为逆变器无功消耗； Q_f 为滤波器输出容性无功， Q_{sc} 为同步调相机输出容性无功； Q_c 为逆变站从交流系统中吸收的无功； E_t 和 X_t 分别为交流系统等值电势与电抗； δ 为 E_t 的相位； P_d 为直流送电有功功率。

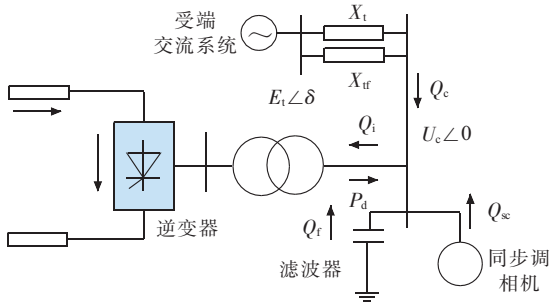


图3 直流逆变站动态无功特性测试系统

特高压直流仿真模型的控制系統采用 ABB 开发的控保系统,即 BPA 中的 DA/DZ 卡模型。整流站具有定有功功率和定最小触发角 α_{\min} 控制方式,逆变器具有定熄弧角和定电流控制方式。如图 4 所示,以直流额定电压和额定电流为基值的低压限流 (voltage dependent current limit control, VDCOL) 三段式特性曲线拐点分别设置为 $u_{\text{dh}}=0.8 \text{ p.u.}$, $i_{\text{dh}}=1.0 \text{ p.u.}$ 和 $u_{\text{dl}}=0.4 \text{ p.u.}$, $i_{\text{dl}}=0.55 \text{ p.u.}$ 。稳态运行条件下, Q_f 和 Q_{sc} 完全补偿无功消耗 Q_i , 逆变站与交流系统无功交换为 0。

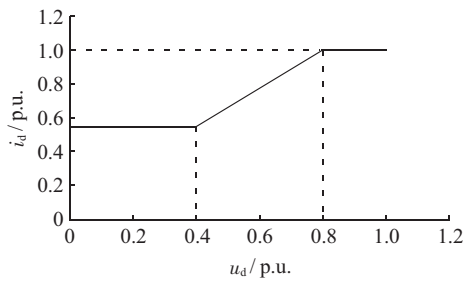


图4 低压限流特性曲线

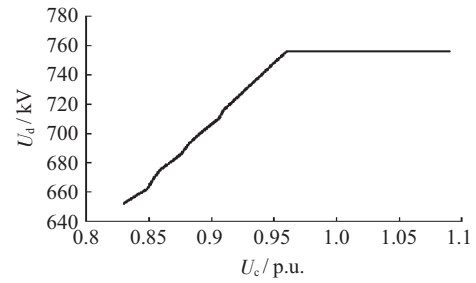
考虑到逆变站动态响应仅取决于高压母线电压幅值变化特性,以下将通过如式(7)所示的交流母线电压波动情况,分析交流母线电压波动过程中直流系统各电气量以及逆变站各主要部件功率变化特性。式(7)中, $E_{10}=1.05 \text{ p.u.}$, $\Delta E_{10}=0.65 \text{ p.u.}$, $\omega_s=1.571 \text{ rad/s}$ 。

$$E_1(t) = E_{10} - \Delta E_1 \sin(\omega_s t) \quad (7)$$

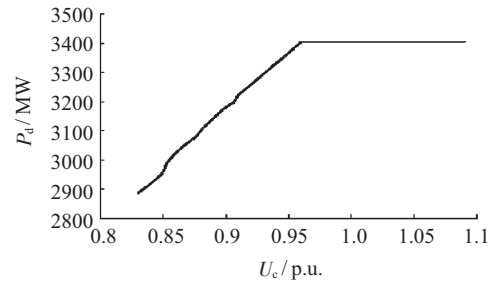
为便于考察电容器与同步调相机对逆变站运行特性的影响,在 $Q_f=3472 \text{ Mvar}$ 、 $Q_{\text{sc}}=3472 \text{ Mvar}$ 情况下,利用 BPA 暂态计算工具进行仿真。 U_c 从 0.85 p.u. 增加至 1.05 p.u. 过程中,逆变器各电气量及同步调相机的无功出力变化情况如图 5 所示。

逆变站交流侧母线电压降低时,在变压器分接头保持不变的情况下,直流电压相应降低,在逆变侧定熄弧角控制下,熄弧角保持不变;此时,整流侧为定电流控制,直流功率与直流电压变化趋势一致;而调相机无功出力随着电压降低而迅速增加,有助于交流电网电压的恢复。

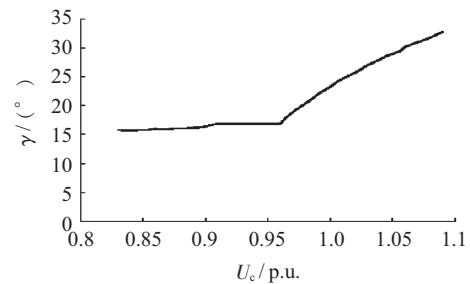
逆变站交流侧母线电压升高时,同时使变压器分接头保持不变,逆变站定电压控制下,直流侧电压保



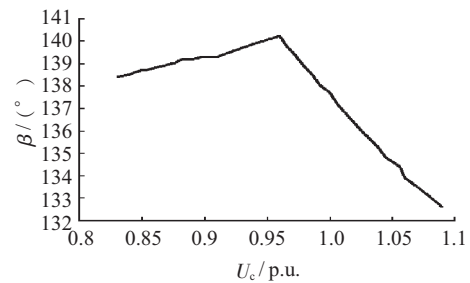
(a) 直流电压 - 交流母线电压



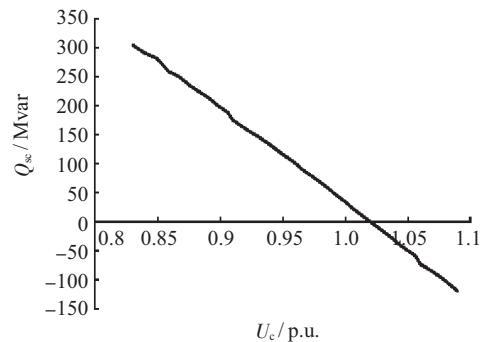
(b) 直流功率 - 交流母线电压



(c) 熄弧角 - 交流母线电压



(d) 触发角 - 交流母线电压



(e) 调相机无功出力 - 交流母线电压

图5 直流逆变站电气量及同步调相机无功出力变化情况

持恒定,熄弧角逐渐增加,直流功率保持不变;而调相机无功出力随着电压的增加而迅速减小,并从电网吸收大量无功功率,抑制了电网电压的快速上升。

4 结束语

在 PSD-BPA 中建立了特高压直流暂态仿真计算模型,并对同步调相机投运后,交流电网电压波动过程中,直流逆变站的电气量变化和同步调相机无功出力情况进行了仿真计算,结果表明电压波动过程中,同步调相机有助于电网电压的快速恢复,保证了直流逆变站的稳定运行。

参考文献:

- [1] 吴鹏,田猛,陆云才,等. 锦—苏特高压直流对江苏电网变压器直流偏磁的影响[J]. 江苏电机工程,2014,33(1):5-7.
- [2] 郭小江,马世英,卜广全,等. 上海多馈入直流系统的无功控制策略[J]. 电网技术,2009,33(7):30-35.
- [3] 郑超,马世英,盛灿辉,等. 以直流逆变站为动态无功源的暂态电压稳定控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6141-6149.
- [4] 邵瑶,汤涌,郭小江,等. 多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J]. 电网技术,2011,35(12):50-55.
- [5] 李春华,黄伟雄,袁志昌,等. 南方电网±Mvar 链式 STATCOM

- 系统控制策略[J]. 电力系统自动化,2010,37(3):116-121.
- [6] 管秀鹏,孙元章,赵国梁,等. 南方电网西电东送暂态功率传输极限研究[J]. 电网技术,2004,28(2):1-5.
 - [7] 刘振亚,张启平,王雅婷,等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(5):1015-1022.
 - [8] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2005:37-51.
 - [9] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2011:31-92.

作者简介:

- 张宁宇(1985),男,山西五台人,工程师,从事电力系统优化与运行、柔性交直流输电研究工作;
- 刘建坤(1980),男,山东潍坊人,高级工程师,从事电力系统仿真分析、电力系统规划和运行以及柔性交直流输电等研究工作;
- 周前(1978),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事电力系统分析与计算研究工作;
- 汪成根(1981),男,安徽桐城人,工程师,从事电力系统安全稳定紧急控制研究工作。

Analysis on the Impact of Synchronous Condenser on DC Inverter Operating Characteristic

ZHANG Ningyu, LIU Jiankun, ZHOU Qian, WANG Chenggen

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The reactive power compensation devices located at high voltage DC inverter is mainly used to provide reactive power to support active power transmission. The dynamic characteristics of reactive power devices have significant influence on voltage stability and DC operating characteristics. Based on control strategy, this paper analyzes the influence of synchronous condenser on DC inverter operating characteristic during AC voltage fluctuations. The characteristics of reactive power output and the response characteristics of the inverter station are revealed and verified by simulation results. The research provides theoretical foundations to the integration of large capacity synchronous condenser to multi-infeed DC power grid.

Key words: UHVDC; inverter station; synchronous condenser; operating characteristic

(上接第 16 页)

Study on Grid Response Mechanism to Large-scale Outer Power Loss

WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, HU Haoming, ZHU Xingyao

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the development of Jiangsu UHV power grid, reliable outer power is important for regional power supply. Supports from provincial power grids are needed at the receiving end of UHVDC which brings large amount power into the grids. The loss of power caused by bipolar blocking needs to be allocated and the power flow among the power grid has to be redistributed. Taking a historical UHVDC blocking event in Jiangsu power grid as an example, responding characteristic of local power sources and supporting characteristic of outer power sources are analyzed for the case of outside power loss. The research provides some references to the power flow control for outside power loss.

Key words: outer power; UHVDC; bipolar blocking; electricity and power balance; power sources