

Study on Reactive Power Compensation Scheme for Converter Station of Hami-Zhengzhou ± 800 kV DC Transmission Project

Tao Niu¹, Kang Qian¹, Yingjiao Zhang²

¹Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing

²Nanjing Power Supply Company, Nanjing

Email: niutao@jspdi.com.cn

Received: Dec. 18th, 2012; revised: Jan. 4th, 2013; accepted: Jan. 15th, 2013

Abstract: The research on reactive power compensation of converter station is an important component in the design of UHVDC project. Taking ± 800 kV DC project from Hami to Zhengzhou for example, the reactive power consumption of converter station under different operating modes is calculated according to corresponding calculation principle. Then the total capacity of reactive power compensation devices of converter stations at both terminals and the group capacity are researched. Based on results of calculation and analysis, a configuration scheme of reactive power compensation devices is proposed.

Keywords: UHVDC; Converter Station; Reactive Power Compensation

哈密 - 郑州 ± 800 kV 直流输电工程换流站无功补偿研究

牛涛¹, 钱康¹, 张英娇²

¹江苏省电力设计院, 南京

²南京市供电公司, 南京

Email: niutao@jspdi.com.cn

收稿日期: 2012年12月18日; 修回日期: 2013年1月4日; 录用日期: 2013年1月15日

摘要: 换流站无功补偿的研究是特高压直流设计的重要组成部分。本文以哈密 - 郑州 ± 800 kV 直流输电工程为例, 按照相应的计算原则计算了不同运行方式下的换流站无功消耗, 研究了两端换流站的无功补偿总容量和小组容量要求, 在此基础上提出了换流站的无功补偿设备配置方案。

关键词: 特高压直流; 换流站; 无功补偿

1. 引言

特高压直流输电系统在运行中需要消耗大量的无功功率。为保证换流站的安全可靠运行, 需保证无功功率的平衡, 无功功率过剩或不足可能造成交流电压的不稳定, 严重时可能危及整个交、直流系统的安全稳定运行。换流站无功补偿涉及设备、运行、控制、安全性和经济性等因素。从电网角度看, 换流站的无功调节要与系统的无功电压相协调; 从换流站角度看,

无功补偿要与直流系统的技术要求相协调。直流换流站装设的无功补偿装置通常由交流滤波器及电容器组成, 其中交流滤波器既能提供容性无功功率, 还可将直流系统产生的大量交流谐波分量降低到允许范围内。换流站的无功补偿容量及其分组配置研究是直流系统设计的重要组成部分^[1-4]。

为实现“疆电外送”, 促进新疆地方经济发展, 同时保障河南能源安全及负荷增长的需要, 国家电网

公司规划建设哈密 - 郑州±800 kV 直流输电工程。届时将实现特高压远距离、大容量电力输送, 落实了我国能源战略。本文根据直流系统的稳态模型, 对哈密 - 郑州±800 kV 直流输电工程的各种运行方式进行了计算分析, 提出了直流系统两端换流站的无功补偿总容量和无功分组容量配置方案。

2. 系统条件

2.1. 交流系统条件

哈密 - 郑州直流输电工程额定容量为 7500 MW, 额定直流电压为±800 kV, 额定直流电流为 4.6875 kA。

交流电网无功功率应分层分区就地平衡, 避免远距离输送。对于受端郑州换流站位于河南负荷中心, 附近交流系统没有多余的无功容量; 对于送端哈密换流站, 可以利用交流系统提供的少量无功功率, 但根据以往工程经验, 交流系统提供的无功功率相对于换流站的无功消耗是非常小的。由于该工程目前仅是开展前期工作, 缺少当地电网及电厂参数, 因此本文暂按换流站所需的无功补偿容量全部为站内自补偿考虑。

2.2. 直流系统条件

1) 直流运行接线方式和直流电压

哈密 - 郑州采用双 12 脉动阀组串联接线结构, 正常全压运行方式下哈密站的直流电压为±800 kV。每极都应具有在直流降压至 70%~100%正常直流电压内连续运行的能力, 同时应具有 5%过负荷运行能力。

2) 线路参数

直流线路导线型号为 LGJ-6 × 900, 线路长度约 2300 km; 接地极线路采用双回导线, 导线型号为 LGJ-2 × 500, 哈密站接地极线路长度约为 66 km, 郑州站接地极线路长度约为 38 km。双极运行时的直流电阻为 12.31 Ω。

3) 控制策略

角度控制(如 α 和 γ), 使换流器正常运行于控制角度范围之内, 直流电压的变化由换流变分接头调节补偿, 这种方式吸收无功少, 运行经济, 直流运行性能较好, 但是这种调节方式分接头开关动作频繁, 要求的分接头调节范围也较大; 电压控制, 保持换流变压器阀侧或直流空载电压恒定, 这种方式要求的分接头

调节范围较小, 动作较少, 直流运行性能则相对差些。

近年来我国建设的长距离高压直流输电工程一般都采用整流侧定触发角控制, 逆变侧定熄弧角控制。因此哈密 - 郑州直流输电工程也暂按采用这种控制方式考虑。实际控制策略应综合考虑系统运行要求、主回路参数计算结果、主设备参数等因素而制定, 本文暂不研究。

3. 换流站容性无功消耗

换流站的无功消耗与直流输送功率、直流电压、直流电流、换相角以及换相电抗等因素有关。整流侧换流站的无功消耗量可由下式计算^[1,5,6]:

$$Q_{dc} = P \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

其中

$$\tan \varphi = \frac{(\pi/108) \times \mu - \sin \mu \times \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \times \sin(2\alpha + \mu)}$$

$$\mu = \arccos \left[\frac{U_d}{U_{dio}} - \frac{X_t \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot E_{11}} \right] - \alpha$$

$$\frac{U_d}{U_{dio}} = \cos(\alpha) - \frac{X_t \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot E_{11}}$$

式中: Q_{dc} 为换流站的无功消耗; P 为换流站直流侧有功功率; φ 为换流站的功率因数角; α 为整流侧触发角; U_d 为直流电压; U_{dio} 为理想直流空载电压;

$X_t \approx \frac{\pi \cdot U_{dioN} \cdot e_k}{6I_{dN}}$ 为换相电抗(e_k 为换流变压器的短路

阻抗); I_d 为直流运行电流; $E_{11} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} U_{dio}$ 为换流变压器阀侧空载电压有效值。

逆变侧换流站的无功消耗量也可由上式计算得到, 只需将其中的整流侧触发角 α 更换为逆变侧熄弧角 γ 即可。

在计算中考虑设备的制造公差和测量误差, 并按以下原则: 1) U_d/U_{dio} 取最小值; 2) 直流线路电阻取最小值; 3) 触发角、熄弧角取最大值; 4) 换相电抗取最大值; 5) 直流电压取最小值; 6) 直流电流取最大值。

系统在双极正常运行方式和双极 5%过负荷运行方式时的最大无功消耗见表 1 所示。

Table 1. Maximum reactive power compensation of converter station at both ends

表 1. 两端换流站最大无功消耗

运行方式	哈密/Mvar	郑州/Mvar
双极正常方式	4260	4285
双极 5%过负荷方式	4559	4584

4. 换流站容性无功配置方案

4.1. 无功小组容量的确定

换流站的无功补偿装置须分组投切运行，以适应直流各种运行方式的需要。换流站无功分组方案的确定是一个不断优化过程。一般在换流站总无功补偿容量一定的情况下，分组越少，投资和占地越省。

换流站投切无功小组时，交流系统的电压会发生变化，无功小组容量越大，电压的变化也越大。根据《高压直流换流站设计技术规定》(DL/T 5223-2005)的要求：“对单组无功元件的投切，稳态交流母线电压变化率不应超过额定电压的 1%~2%”^[7]。换流站投切的无功分组容量与换流站交流母线的电压变化率之间的关系可由式(2)进行估算^[8]，但具体的电压波动应以电力系统计算程序建模计算为准。

$$\Delta U = \Delta Q / (S_d - \sum Q_{\text{filter}}) \quad (2)$$

式中： ΔU 为换流站交流母线的电压变化率； ΔQ 为换流站投切的无功分组容量； S_d 为换流站交流母线的短路容量； $\sum Q_{\text{filter}}$ 为投切后换流站交流母线上总的无功补偿容量。

4.2. 容性无功分组方案

首先根据换流站交流侧的短路容量初步估算无功小组容量，再根据系统运行方式的变化，结合无功大组与小组的合理匹配，对无功分组容量做进一步优化(满足设计规定的各项要求并便于总平面布置)，最终得出换流站的无功分组数以及大组、小组的分组容量配置方案。

根据换流站容性无功消耗以及无功小组容量范围计算结论，提出两个容性无功分组方案，请见表 2。

上述两个方案均可补偿换流站容性无功消耗，其中方案一对无功大组开关切除容性电流的能力提出了较高的要求。根据向开关生产厂家了解的情况，目前断路器可开断容性电流能力已提高，上述两个方案

Table 2. Capacitive reactive power grouping scheme

表 2. 容性无功分组方案

项目	方案一		方案二	
	哈密	郑州	哈密	郑州
大组情况				
大组数	4	4	5	5
最大大组无功容量(Mvar)	1200	1200	1000	1000
小组情况				
小组数	15	19	18	23
最大小组无功容量(Mvar)	300	240	250	200
容性无功总容量(Mvar)	4500	4560	4500	4600

均是可行的。考虑到方案一较方案二节约占地，投资较小，因此推荐方案一。

4.3. 换流站无功补偿容量的校核

两端换流站的实际容性无功需求需要综合考虑换流站最大无功消耗、交流系统提供/吸收无功能力、电压运行水平和无功备用容量，因此为了检验表2所给出的容性无功补偿总容量和分组容量是否能够满足无功补偿的需求，本节对表2方案进行了校核。

对于双极全压正常运行方式，换流站无功补偿总容量应满足下式的要求^[1,5]：

$$Q_{\text{total}} \geq (Q_{ac} + Q_{dc}) / k^2 + Q_{sb} \quad (3)$$

式中： Q_{total} 为换流站所需的无功补偿总容量； Q_{ac} 为交流系统提供的无功； Q_{dc} 为换流站消耗的无功量； Q_{sb} 为换流站的无功备用容量，通常按照一个无功小组考虑； k 为电压修正系数，计算中一般取 $k = 1.0$ 。

对于哈密换流站，双极全压正常运行方式下 $Q_{ac} = 0$ ， $Q_{dc} = 4260$ ， $Q_{sb} = 300$ ，代入上式可得 $Q_{\text{total}} \geq 4560$ 。

对于郑州换流站，双极全压正常运行方式下 $Q_{ac} = 0$ ， $Q_{dc} = 4285$ ， $Q_{sb} = 240$ ，代入上式可得 $Q_{\text{total}} \geq 4525$ 。

综合双极 5%过负荷方式，哈密、郑州换流站所需的容性无功总需求分别为 4560 Mvar、4584 Mvar。表 2 所示两方案均可基本满足容性无功补偿需求。

5. 换流站感性无功分组配置方案

双极小负荷方式运行时(直流功率 750 MW，即

10%), 换流站消耗的容性无功功率仍可采用式(1)进行计算。

在计算中考虑设备的制造公差和测量误差, 并按以下原则: 1) U_d/U_{dio} 取最大值; 2) 直流线路电阻取最大值; 3) 增加触发角、熄弧角; 4) 换相电抗取最小值; 5) 直流电压取最大值; 6) 直流电流取最小值。

小负荷方式运行时换流站消耗的容性无功功率较少, 但为满足滤波要求, 需投入一定的滤波器(本文考虑 2 组), 因此在小负荷方式运行时, 换流站可能产生过剩无功。此时, 需要合理配置感性无功补偿装置。

考虑最严重的工况, 即换流站交流母线取最高运行电压, 则为满足滤波要求必须投入的最小交流滤波器组合的容量可通过下式计算得到。

$$Q_{f \min} = nQ_{\text{filter}} \cdot (U_{ac \max} / U_{acN})^2 \quad (4)$$

式中: $Q_{f \min}$ 为由滤波器产生的无功功率; n 为投入的滤波器组数; Q_{filter} 为滤波器单组容量; $U_{ac \max}$ 、 U_{acN} 分别为换流站交流母线的最高运行电压(525 kV)和正常运行电压(515 kV)。

换流站所需的感性无功补偿设备容量按下式计算^[5]:

$$Q_r \geq Q_{f \min} - (Q_{ac} + Q_{dc}) / k^2 \quad (5)$$

式中: Q_r 为换流站感性无功补偿设备所能吸收的总无功功率; Q_{ac} 为允许从换流站流进系统的无功功率; $Q_{f \min}$ 、 Q_{dc} 、 k 的含义与前面公式一致。

根据(4), (5)的计算, 可以得到容性无功分组的两个方案下换流站的感性无功需求, 请详见表 3。

由此可见, 采用无功分组方案一时, 哈密换流站感性无功需求仅 30 Mvar, 由于计算过程中留有裕度, 因此也可不配置感性无功补偿装置, 郑州换流站不需

配置感性无功补偿装置; 采用无功分组方案二时, 两端换流站均不需配置感性无功补偿装置。

6. 结论

哈密 - 郑州±800 kV 直流输电工程换流站无功补偿计算结论如下:

1) 直流双极全压正常运行方式下, 哈密、郑州换流站消耗的容性无功分别约 4260 Mvar、4285 Mvar; 双极 5%过负荷运行时, 无功消耗较正常方式有所增加, 分别达到 4559 Mvar、4584 Mvar。

2) 哈密换流站配置 4 大组共 15 小组 300 Mvar 容性无功补偿容量; 郑州换流站配置 4 大组共 19 小组 240 Mvar 容性无功补偿容量, 可以满足各种运行方式下换流站的无功需求。

3) 小负荷方式运行时, 为满足最小滤波要求需投入 2 组滤波器组, 两端换流站可不配置感性无功补偿装置。

参考文献 (References)

- [1] 杜志明. 贵广第二回直流输电工程换流站无功补偿的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 69-74.
- [2] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005 年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
- [5] 金小明, 赵勇, 伍文城, 钟杰峰. 云广±800 kV 直流输电工程换流站无功配置研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(4): 14-18.
- [6] 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.
- [7] DL/T 5223-2005, 高压直流换流站设计技术规定[S].
- [8] 殷威扬, 杨志栋. 特高压直流工程无功平衡和补偿策略[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 50-54.

Table 3. Converter Station inductive reactive demand under two schemes

表 3. 两方案下换流站感性无功需求

参数/换流站	哈密/Mvar	郑州/Mvar
Q_{ac}	0	0
Q_{dc}	594	500
Q_{filter}	300/250	240/200
$Q_{f \min}$	624/520	499/416
Q_r	30/-74	-1/-84

注: 1) “/” 前后分别为容性无功分组方案一和方案二; 2) 暂不考虑交流系统吸收换流站过剩无功能力。