

直流输电换流站无功功率控制功能设计

张望, 郝俊芳, 曹森, 李延龙

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 直流输电系统无功功率控制的目的是保证交直流系统的无功交换满足系统要求, 同时减轻换流站谐波对交直流系统及主设备的危害。实际工程中无功控制主要通过对交流滤波器组等无功单元的投切实现。需要考虑的因素有, 交直流系统无功交换的平衡、交流系统稳态电压的限制、基本滤波条件的保证和滤波性能的优化、无功单元投切的均衡性、投切过程对系统的扰动等。直流输电系统的无功控制是一种多目标、多边界条件的复杂控制功能。按照实际工程的要求, 对直流输电无功控制功能和策略的设计进行了全面的分析和介绍。

关键词: 高压直流输电; 无功功率控制; 绝对最小滤波器组; 交流电压限制; 无功限制; 基于交流电压/无功功率的无功控制

Design of reactive power control for HVDC converter station

ZHANG Wang, HAO Jun-fang, CAO Sen, LI Yan-long

(XJ Electric Co. Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: The purpose of the reactive power control of HVDC system is to balance the reactive power exchanged between the AC and DC systems, and also to mitigate the harms of the harmonics produced by the converters to the system and the primary equipments. The reactive power control is realized mainly by switching of AC filter sub-banks on and off in stepped manner. Different aspects have to be considered for the reactive power control including the quantity of the reactive power being exchanged, limitation of steady state AC voltage, demands and optimizing of harmonic filtering, switching equalization of the sub-banks, elimination of disturbance caused by the sub-bank switching etc. The HVDC reactive power control is of complicated multi-target and multi-boundary control function. Based on the requirement in real HVDC project, the design principle for detailed functions and strategies of reactive power control are analyzed and introduced in this paper.

Key words: HVDC transmission; reactive power control; ABS min filter; U-max; Q-max; Q-control/U-control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0072-05

0 引言

直流输电系统消耗的无功功率随换流器的运行状态和直流输送功率的增减而变化, 自然状态下这些无功消耗由交流系统提供, 不加治理将会破坏交流系统的无功平衡。同时, 换流器运行产生的特征谐波和非特征谐波还会对交流系统造成污染。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, 对换流站谐波进行补偿。

理想情况是, 在直流输送功率从最小值到长期过负荷值之间的任何功率水平上, 通过线性的控制和补偿, 使交直流系统的无功交换为零, 同时使换流站送到交流系统的谐波为零。而在实际工程中, 对系统无功和谐波的控制主要通过交流滤波器、并联电容器以及并联电抗器等无功单元的投切控制,

进行台阶式的补偿, 使交直流系统的无功交换容量在允许的偏差范围 $\pm\Delta Q$ 之内, 并通过不同类型滤波器分组的合理组合, 满足滤除换流站谐波的要求。作为台阶式无功控制的补充, 工程中一般还在极控系统中配置一些辅助控制功能, 通过对换流器触发角的调节, 在一定的范围内对无功进行连续的控制, 并限制无功单元投切过程的瞬态电压波动, 从而优化无功控制的整体性能。

1 无功单元的类型和配置

换流站无功单元一般包括交流滤波器、并联电容器和并联电抗器等不同的类型。其中并联电容器用于直接对换流器消耗的无功进行补偿; 并联电抗器主要针对和换流站连接的交流长线路而配置。由于长线路的分布电容可造成换流站交流母线的电压

升高, 在直流系统停运或换流器低功率运行时, 投入并联电抗器可以使交流电压恢复到正常水平; 交流滤波器根据直流工程特征谐波的情况进行设计和配置, 一般包括单调谐滤波器、双调谐滤波器、三调谐滤波器以及高通滤波器等不同的类型。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, 而在基波频率下为系统提供容性无功。换流站配备的无功单元的总容量、分组数量和每个分组的无功容量, 由系统研究综合考虑具体工程的交直流系统参数、直流输送功率、允许的无功交换偏差值 ΔQ , 以及换流器在各种正常运行工况下的谐波水平等情况, 通过优化设计确定。无功偏差值 ΔQ 一般考虑稍大于最大无功单元分组容量的一半。

2 无功控制的功能和策略

无功控制主要由站控系统完成, 其功能框图如图 1 所示。无功控制功能由多个子功能组成, 每个子功能按照预先设定的优先级和判据条件实现其特定的控制功能。某个子功能发出的投切指令必须与更高优先级的子功能的控制要求不产生冲突时才能被有效执行。通过各个子功能的有机配合, 达到

优化的控制效果, 并满足系统运行的基本滤波要求、交流电压和无功交换限制等边界条件。按照优先级 1 最高, 优先级 5 最低的顺序, 无功控制的子功能一般包括。

优先级 1: Abs Min Filter 绝对最小滤波器控制;

优先级 2: U-max 最高/最低电压限制;

优先级 3: Q-max 最大无功交换限制;

优先级 4: Min Filter 最小滤波器组控制;

优先级 5: Q-control/U-control 无功判据/交流电压判据的无功控制。

2.1 Q-control / U-control 无功判据和交流电压判据的无功控制

根据以上的优先级排序 Q-control 和 U-control 的优先级最低, 但它们却是无功控制最基本的子功能。由于在任何时刻只能选择两者中的一个对无功单元的投切进行在线控制, 所以它们拥有一个共同的优先级。Q-control 和 U-control 的输出均为增加或减少 (Inc/Dec) 滤波器组数, 即它们分别根据无功和交流电压判据条件, 决定是否需要投入或切除无功单元。但无功单元能否真正投入和切除, 还要由更高优先级的其它无功控制子功能所确定的边界条件决定。

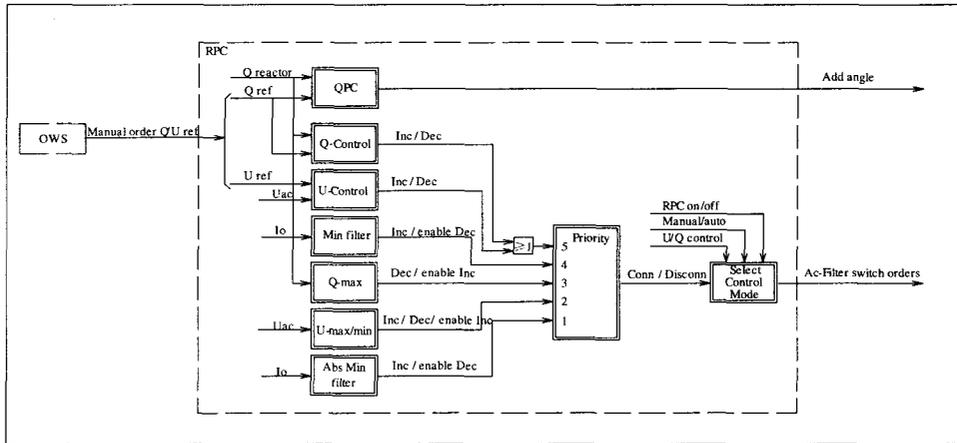


图 1 无功控制功能框图

Fig.1 Schematic diagram of reactive power control

1) Q-control 无功判据的无功控制。Q-control 的输入为交直流系统无功交换的实际值和无功参考值, 在运行人员选择以无功交换为判据对无功单元进行投切控制时, Q-control 对两者进行比较并发出相应的投切命令, 控制换流站与交流系统的无功交换容量在允许的偏差值 $\pm \Delta Q$ 范围之内。

换流站与交流系统的无功交换由以下公式计算得到:

$$Q_{exc} = Q_{filt} - Q_{conv} \quad (1)$$

$$Q_{filt} = \sum (U_{ac} / U_{acN})^2 \times Q_{filtN} \quad (2)$$

$$Q_{conv} = I_d \times U_{dio} \times (1/4) \times \left\{ \left[2u + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + u) \right] / \left[\cos \alpha - \cos(\alpha + u) \right] \right\} \quad (3)$$

式中: Q_{exc} 为交直流系统之间的无功交换容量;

Q_{filt} 为投入运行的无功单元提供的无功总容量;

Q_{conv} 为换流器消耗的无功功率; Q_{filtN} 为额定电压下无功单元的无功容量; U_{d10} 为 6 脉动换流器的理想空载直流电压; U_{ac} 为交流母线电压; U_{acN} 为额定交流母线电压; I_d 为直流电流; α 为触发角; u 为换相角。

2) U-control 交流电压判据的无功控制。U-control 的输入为交流系统电压的实际值和电压参考值, U-control 对两者进行比较并发出无功单元的投切命令, 控制换流站交流母线电压变化处于设定的电压参考值 $\pm \Delta U$ 范围之内。因在与换流站相连的交流系统比较弱的情况下, 无功的增减将会比较显著的引起交流电压的波动, 所以弱交流系统一般选择 U-control 模式, 以便通过无功单元的投切对系统电压的波动进行更为直接和有效的限制。

2.2 Abs Min Filer 绝对最小滤波器组控制

绝对最小滤波器组控制子功能在无功控制中处于最高的优先级, 其功能是保证换流站具备最基本的滤波条件。该子功能的输入为换流器的最小电流 I_0 , 控制输出为两个: 投入滤波器和允许切除滤波器 (Inc/enable Dec)。在换流器解锁并检测到最小电流 I_0 或在解锁之前, Abs Min Filer 控制功能即按照预先确定的滤波器的类型选择投入绝对最小滤波器组, 并在直流系统运行的整个功率范围内, 对绝对最小滤波器组条件进行监视。在其它无功控制子

功能提出切除无功单元的请求, 而切除可能造成绝对最小滤波器组条件不满足时, Abs Min Filer 控制功能将闭锁切除操作的执行。

2.3 U_{max} 最高/最低电压限制

从图 1 可见, U_{max} 子功能在绝对最小滤波器组控制之后处于无功控制的第二优先级, 负责保证在直流系统的运行过程中与换流站相连的交流系统电压不超过其最大和最小限制值。其详细的功能框图如图 2 所示。 U_{max} 功能分两个部分:

其一作为独立的控制单元监视交流母线的稳态电压, 如果电压超过最大限幅值 U_{MAX_LIMIT} 且持续一定时间, U_{max} 直接发出切除滤波器组的指令, 按一定的策略顺序切除滤波器组, 直到电压回到正常范围或只剩下 Abs min filter 为止。如果电压低于最低限幅值 U_{MIN_LIMIT} 并持续规定时间, U_{max} 直接发出投入滤波器组的指令, 按规定的顺序投入滤波器组, 直到电压回到正常范围或没有可用的无功单元可供投入为止。

U_{max} 的第二个功能是作为其它低优先级的无功控制子功能 (如 Q_{max} 、Min Filter、Q-control 等) 的电压限制条件, 决定它们对无功单元的投切是否执行。比如, 如果下一组滤波器的投入将造成交流电压超过最高电压限制值 $U_{MAX_LIM_ENBL}$, 那么 U_{max} 功能将禁止投入滤波器组的操作。同理, 如果切除一组滤波器将引起电压低于最低电压限制值 $U_{MIN_LIM_ENBL}$, U_{max} 将禁止切除滤波器组的操作。

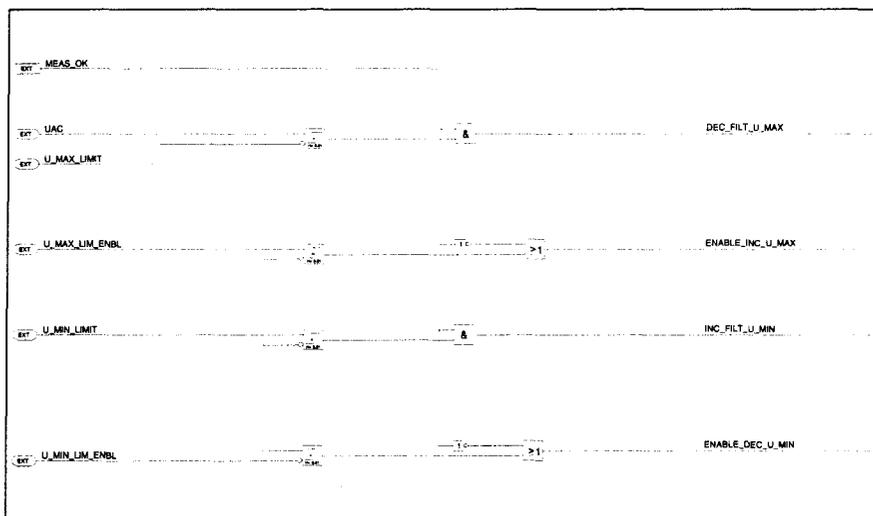


图 2 U_{max} 功能框图

Fig.2 Schematic diagram of U_{max}

2.4 Q_{max} 最大无功交换限制

与 U_{max} 类似, Q_{max} 的第一个功能是以换流站送

入交流系统的最大容性无功为判据, 当其超过预先设定的最大值时直接发出切除无功单元的指令。另

一个功能是作为其它无功控制子功能的无功限制条件, 决定下一个无功单元的投入是否能够执行。如果 Q_{\max} 判定下一组滤波器的投入将引起送入交流系统的无功超过最高限幅值, Q_{\max} 将闭锁投入滤波器组的操作。 Q_{\max} 与 U_{\max} 的区别是 Q_{\max} 的作用是单方向的, 它只负责切除滤波器和限制滤波器的投入。而 U_{\max} 的作用是双向的, 同时作用于滤波器的投入和切除。

2.5 Min Filter 最小滤波器组控制

Min Filter 最小滤波器组控制功能以系统是否满足换流站的滤波特性为判据, 对最小滤波器组的投切进行控制。其第一个功能是根据换流站整流/逆变运行状态和直流输送功率, 计算出满足谐波滤波性能所需投入的滤波器组的最小数量和类型。当滤波条件不满足时选择符合类型要求的滤波器组并发出投入指令。但滤波器是否能够投入, 由更高优先级的无功控制子功能所设定的无功与电压条件的限制。其第二个功能是当低优先级的无功控制判据 (Q-control/U-control) 对滤波器组的切除将造成不满足最小滤波器组条件时, Min Filter 功能将限制切除滤波器的操作(enable Dec)。

2.6 由极控系统完成的无功控制辅助功能

为了获得更好的无功控制效果, 并减轻投切无功单元对系统的扰动, 无功控制还包含一些辅助的控制功能, 如 QPC 功能和 Gamma kike 功能等。这些功能在极控系统中通过触发角的闭环或开环控制实现。

1) QPC 功能

QPC 功能由 PI 环节构成, 其输入为换流站与交流系统无功交换的实测值, 输出为触发脉冲角度的增加值。当由于某些原因 (如 Abs Min Filer 绝对最小滤波器控制等) 造成无法切除多余的无功单元, 使得换流站容性无功超过某一设定值时, QPC 功能通过增大触发角或熄弧角增加换流器的无功消耗, 从而改善系统的无功平衡。根据直流系统运行的需要, 运行人员可以选择投入或退出 QPC 功能。在 QPC 功能投入的情况下, 仅当站控选择 Q-control 作为无功单元投切判据时 QPC 功能才有效。

2) Gamma kick 功能

无功单元的投切会造成换流站交流电压的波动, 特别是对于在较弱的交流系统工况下运行, 如果没有辅助的控制措施, 投切滤波器造成的电压动态变化将会超过工程的允许值, 严重时可能导致逆变侧的换相失败。因此, 与站控系统的无功单元投切控制配合, 极控系统一般需要配置 gamma kick 功能。gamma kick 功能仅在逆变侧有效, 该功能在

投切滤波器的瞬间暂时增大熄弧角, 增加换流器的无功消耗限制交流电压的动态变化, 防止换相失败的产生。

3 无功控制模式

无功控制功能在总体上具备以下控制模式: ON 模式、OFF 模式、手动模式和自动模式。这些运行方式由运行人员根据系统运行的需要进行选择。

1) ON 模式: 当选择 ON 模式时, 无功控制功能投入运行并自动进入手动模式。此时, 运行人员可选择自动模式。

2) 手动模式: 手动模式下, 高优先级的 Abs Min Filter; U_{\max} ; Q_{\max} 等仍将处于自动状态, 以保证系统的绝对最小滤波器组要求、最大及最小电压限制, 以及最大无功交换等边界条件的满足。仅 Min filter 和 U control/Q control 等较低优先级的无功控制功能负责的无功单元投切操作, 根据系统提示由运行人员手动完成。当需要投入滤波器组以满足 Min filter 条件时, 或需要投切除滤波器满足 U control/Q control 的需求时, 系统将通过人机接口提示出需要投入或退出的特定滤波器组, 由运行人员进行投切操作。

3) 自动模式: 当选择自动无功控制模式时, 所有滤波器组和无功单元的投切都由无功控制自动完成。运行人员仅需设定相关的参考值和滞回特性的上下窗口值。

4) OFF 模式: 当无功控制选择 OFF 模式时, 无功控制功能退出, 无功控制将不再进行任何投/切滤波器的操作, 也不会对运行人员给出任何提示。但在 OFF 模式下运行人员仍可对无功单元进行手动投切。

4 无功控制需要考虑的其它问题

1) 滤波器组投切的均衡性: 无功控制根据当前的运行工况及每个滤波器组的可用状态确定哪一类型的滤波器以及哪一组滤波器可以被投入或切除。同一类型的滤波器组将循环投入, 并保证所有可用无功单元的投切尽可能均衡。

2) 滤波器组的投入顺序: 在直流功率上升和下降的过程中, 以及在正送和倒送两种不同的功率输送方向之下, 滤波器组的投入和切除均应遵循一定的类型顺序, 保证所投入的无功单元具备优化的滤波性能。

3) 滤波器组的替换: 当某一组滤波器由保护跳闸, 须投入另一组滤波器替代失去的无功时。为保

证滤波性能，无功控制功能将对投入的滤波器组进行选择，使新替换的滤波器组尽量与原有的滤波器组类型一致。

4) 滤波器组的状态：无功控制需要获得无功单元的状态信息，如已经投入的滤波器组的数量和类型；被切除的滤波器组；可供投入（可用）的滤波器组的数量和类型等。以便根据当前可用的滤波器组作出优化的投切选择。可用滤波器组的条件是，滤波器本身无故障（该滤波器的保护动作信号复位）、相关的隔离开关和接地刀闸处于规定的开合位置等。对于被切除的滤波器组，必须经过规定的放电时间才被视为可用。对于被选择投入的滤波器组，如果在一定的时间未能对投入指令作出响应，则判定该滤波器组不可用。

当某组滤波器从不可用转为可用状态后，在高优先级的 Min Filter 等功能未提出要求的前提下，无功控制不改变已经投入的滤波器组，该组滤波器被纳入随后的滤波器选择。

5) 防振荡措施：为了防止滤波器组的反复投切，无功控制需要配置防振荡功能，对预定时间内的滤波器的投切次数进行计数。如果投切次数超过了设定值，无功控制将自动转入手动模式，防止出现更多的投切动作。

5 结论

直流输电系统的无功控制主要采用对无功单元的投切实现，并通过与极控系统的触发角控制的配合，保证换流站的无功和谐波条件满足设计要求。无功控制功能的设计需要考虑交流系统电压、交直流系统的无功平衡、以及换流站的谐波水平等多种判据和边界条件，以满足系统安全稳定运行的需要。无功单元的投切控制一般由绝对最小滤波器组控制、交流电压限制、最大无功交换容量限制、最小滤波器组控制、基于交流电压的无功控制、以及基于无功交换的无功控制等控制子功能构成。系统运行中通过各子功能优先级的配合实现无功控制的总体控制策略，达到优化的控制效果。在满足换流站的无功和谐波条件的同时，投切策略的设计还应考虑不同类型的无功单元投切的均衡性，使得在正常情况下直流系统的运行功率在其全部变化范围内，

对每个无功单元的投切选择尽量平均，以避免对某些滤波器组的过分使用。

参考文献

[1] 许继电气股份有限公司.东北—华北联网背靠背高岭换流站工程直流站控制系统设计规范书, ED4 321 GL-0[Z]. 2007.
XJ Electric Corporation Ltd. Design Specification of the Gaoling Back-to-Back Converter Station for DC Connection of Northeast China and North China Networks: Station Control System ED4 321 GL-0[Z]. 2007.

[2] 北京网联直流工程公司. 东北—华北联网背靠背高岭换流站成套设计技术报告: 交流滤波器性能[R].2005. BDCC. System Design Technical Report: Gaoling Back-to-Back Converter Station for DC Connection of Northeast China and North China Networks: AC Filter Performance[R].2005.

[3] 北京网联直流工程公司. 东北—华北联网背靠背高岭换流站成套设计技术报告: 无功功率补偿和控制[R]. 2005. BDCC. System Design Technical Report: Gaoling Back-to-Back Converter Station for DC Connection of Northeast China and North China Networks: Reactive Power Compensation and Control [R]. 2005.

[4] TRC of CSG Guizhou – Guangdong II Line ±500kV DC Transmission Project, Reactive Power Management study report CSG/GG2/ED1.020.XS-a [R]. 2005.

[5] 许继/西门子,云广特高压直流输电工程控制保护系统设计规范书 ED4.351[Z]
XJ and Siemens. Design Specification of the Yunnan-Guangdong ± 800kV UHVDC Project: Control and Protection System ED4.351[Z].

[6] DC Station Control Design Specification of YG, ED4.321.CS-A[Z].

收稿日期：2009-06-04

作者简介：

张 望 (1950-), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电控制保护系统的设备开发和工程; E-mail:wangzh@xjgc.com