

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201112

陕北-武汉特高压直流输电工程无功控制策略研究

艾红杰, 黄金海, 吴金波, 杨成飞, 罗磊, 贾帅锋, 芦明明, 申帅华

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对陕武工程分层接入系统的复杂性和特殊性, 对其无功控制策略进行了优化和完善。在原有无功控制策略的基础上增加了过压快切、紧急停机后的快切以及后备无功控制等功能。过压快切旨在当交流侧电压由于故障急剧升高时, 能够在短时间内快速切除交流滤波器, 保证交流母线电压运行在安全水平。紧急停机后的快切是指在陕武工程出现紧急停运后, 无功控制功能迅速切除在投滤波器组, 确保交流网电压稳定。后备无功是指当执行无功控制功能的两套直流站控主机全部不可用之后, 实现后备无功控制功能的极控接口屏 PCI 能够根据交流母线电压变化, 实现交流滤波器的切除, 从而保证交流母线电压稳定, 维持直流系统稳定运行。通过仿真试验验证了新策略的正确性, 最后对后备无功控制提出了改进建议。

关键词: 特高压直流; 分层接入; 过压快切; 紧急停运; 后备无功

Reactive power control strategy for the Shanbei-Wuhan UHVDC transmission project

AI Hongjie, HUANG Jinhai, WU Jinbo, YANG Chengfei, LUO Lei, JIA Shuaifeng, LU Mingming, SHEN Shuaihua
(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Given the complexity and particularity of the hierarchical connection system of the Shanwu Project, its reactive power control strategy has been optimized and perfected. On the basis of the original reactive power control, overvoltage fast switching, fast switching after emergency shutdown, and backup reactive power control function are added. The overvoltage fast cut is designed such that when the AC side voltage rises sharply because of a fault, the AC filter can be quickly removed to ensure that the AC bus voltage runs at a safe level. Quick resection means that after an emergency shutdown of the project, the reactive power control function quickly switches off the filter banks to ensure the stability of the AC grid voltage. Back-up reactive power control means that when the two sets of DC station control systems are unavailable, the polar control interface panel PCI can effect the removal of the AC filter according to the AC bus overvoltage, thereby ensuring that the AC bus voltage is stable and maintaining the stable operation of the DC system. A simulation experiment verifies the correctness of the new strategy. Finally, the paper offers suggestions for improvement of backup reactive power control.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/18-JS-206).

Key words: HVDC; hierarchical connection mode; overvoltage resection; ESOF; backup reactive power control

0 引言

随着特高压直流线路越来越密集, 直流输电线路对交流电网稳定性的影响也逐渐增大, “强直弱交”的矛盾越发凸显^[1-6], 不同直流线路故障的相互影响越来越紧密, 尤其是给特高压直流送、受端近区交流电网电压支撑能力带来了巨大的压力, 因此

配置合理完善的无功控制策略就显得尤为重要^[7-11]。相对受端单一交流网络而言, 分层接入可实现直流功率输送的优化且短路比更高, 系统间潮流分布更合理, 特别是对提高受端交流系统电压支撑能力的优势明显^[12-17]。有鉴于此, 陕北-武汉工程继续沿用此种系统接入方式。

本工程武汉换流站与拟建的武汉1 000 kV交流变电站合建, 换流站低端接入武汉1 000 kV变电站500 kV母线, 换流站高端接入另外一个500 kV交流

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGTYHT/18-JS-206)

网，换流站高、低端母线之间加装分段断路器。

1 陕武工程无功控制基本策略

图 1 为陕武工程无功控制总体逻辑框图，图中实线框内为基本控制功能，虚线框内为新增的功能，将在下一节重点介绍。基本控制功能描述如下。

Abs Min Filter: 绝对最小滤波器容量限制，为了防止滤波设备过负荷所需投入的绝对最小滤波器组数。任何情况下，该条件必须满足。

U max: 最高电压限制，监视交流母线的稳态电压，避免稳态过电压引起保护动作。

Q max: 最大无功交换限制，根据当前运行状况，限制投入滤波器组的数量，限制稳态过电压。

Min Filter: 最小滤波器容量要求，为满足滤除

谐波的要求需投入的最小滤波器组。

Q control/U control: 无功交换控制/电压控制(可切换)，控制换流站和交流系统的无功交换量为设定的参考值，控制换流站交流母线电压为设定的参考值。

其中，U control 和 Q control 不能同时有效，由运行人员选择当前运行在 U control 还是 Q control。

此外，为了更好的控制效果，在极控中无功控制还提供以下两项辅助功能：

QPC: 通过增大点火角/熄弧角来增大换流站对无功的消耗，避免换流站与交流系统的无功交换量超过限制值。

Gamma kick: 通过在投/切滤波器组时瞬间增大/减小 γ 角，使得电压变化率减小到规范要求的范围以内。

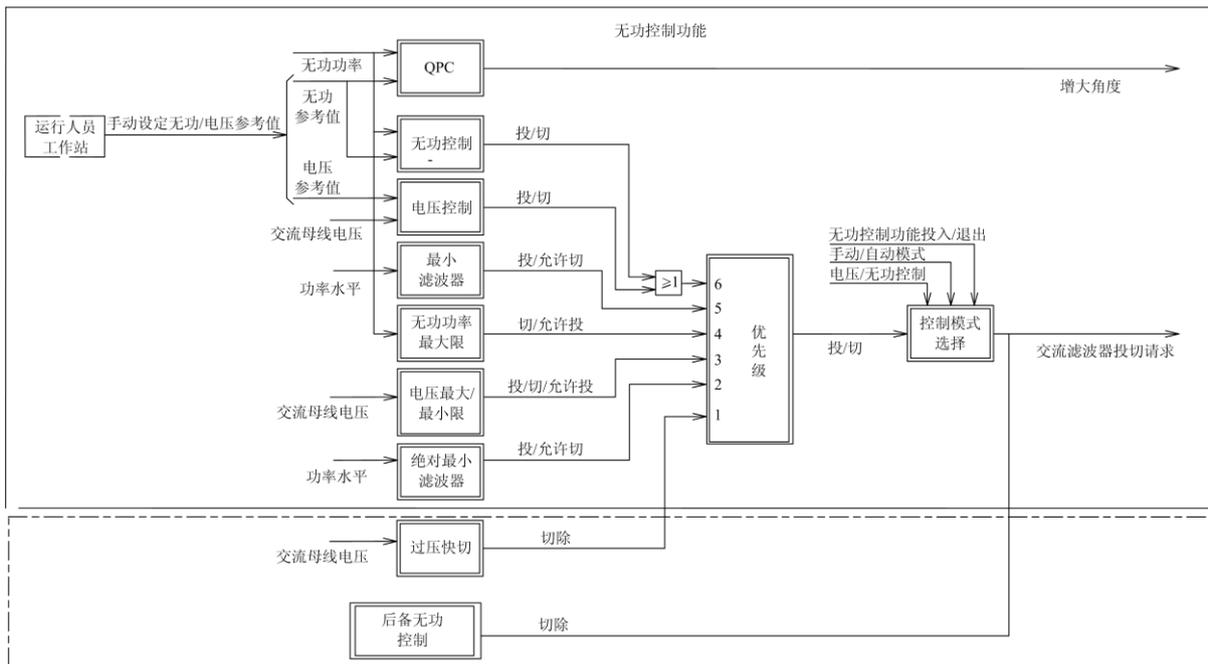


图 1 无功控制逻辑图

Fig. 1 Reactive control logic diagram

2 陕武工程无功新策略

2.1 武汉站无功策略

分层接入方式下两交流系统的无功耦合程度较弱，因此交流滤波器按两个系统来独立配置，无功控制也独立进行^[18-22]。

陕武工程无功控制的特殊性在于武汉站 1 000 kV 变电站建成前，会出现较长一段时间母联闭合高低端分别对应的交流网合环运行。考虑独立和合环运行，武汉站无功控制就变成了“1+1=3”模式，即上述控制功能在高端、低端以及合环时均要具备。独立运

行时高低端独立控制，逻辑清晰，实现相对简单。

而合环运行时由于武汉站高低端换流器对应的交流滤波器容量不一致将带来一系列问题。以 HP12/24 类型为例，高端 500 kV 交流网单组容量为 220 Mvar，低端 500 kV 交流网单组容量为 270 Mvar。直流功率达到某个临界点后需要投入一组某类型滤波器，是投入高端下交流滤波器组还是投入低端对应交流滤波器组；第二，高端和低端交流网下滤波器组按顺序依次投入和交叉均衡投入对系统无功影响也不一致。同期的青豫工程(青海-豫南)豫南换流站因同类型交流滤波器容量一致，功率升降过程中

可不区分高低端直接投入, 所以不存在此类的问题。

陕武工程合环运行时需综合滤波器类型、功率点等因素, 采用交叉投入的方式进行滤波器均衡投切。其原因在于如果高、低端滤波器组顺序投入, 中小功率时滤波器将集中在某几组母线下, 当某一大组母线突然失电会造成大额无功缺失, 严重影响系统无功平衡, 交流母线电压降低造成换相失败。更为重要的是当出现母联开关突然跳开后, 某一段母线下只有很少或者没有滤波器投入, 将造成因绝对最小滤波器不满足而降功率或者闭锁。采用高低端交叉投入的方式可以有效避免上述问题。

同时还需考虑同类型不同容量滤波器投切死区的切换, 这样就可以避免在某些临界功率点发生频繁投切的情况。图 2 为合环运行时技术规范要求的交流滤波器投入顺序。

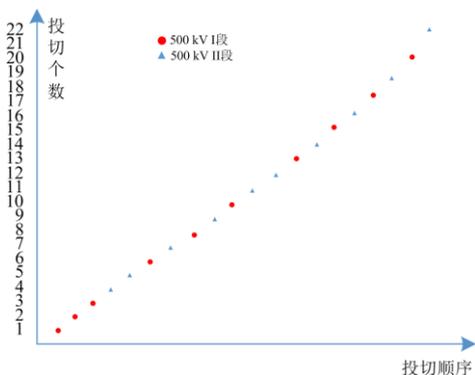


图 2 武汉站交流滤波器投入顺序

Fig. 2 AC filter input sequence of Wuhan station

图 3 为合环运行时功率从 0 升至 8 000 MW 过程中交流滤波器实际投入状态录波。FLTBW1 为高端阀组对应滤波器, FLTBW2 为低端阀组对应滤波器。从图中可以观察滤波器投入顺序与图 2 所示一致, 两个交流网络下滤波器组交替均衡投入。

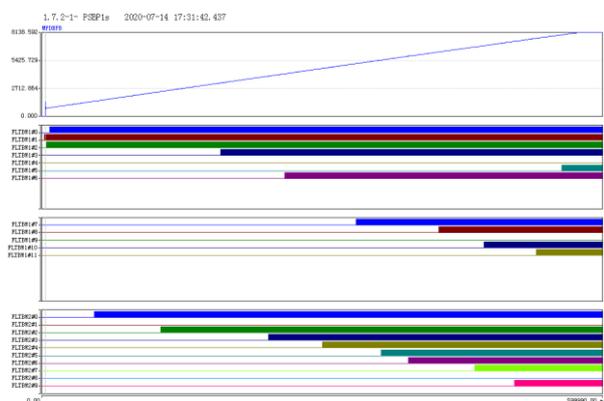


图 3 交流滤波器需求试验录波

Fig. 3 TFR of AC filter requirement test

2.2 陕北站无功策略

为尽量减少换流变分接开关动作次数, 陕武工程分接开关调节死区范围由 $15^\circ \pm 2.5^\circ$ 调整为 $10^\circ \sim 25^\circ$, 即触发角小于 10° 或者大于 25° 才会调整分接开关。但陕北换流站早期成套设计时, 滤波器种类和容量是依据 $15^\circ \pm 2.5^\circ$ 触发角变化范围所设置。

由于分接开关策略的调整, 0.2 p.u. 以上功率点触发角与之前成套设计不同, 系统消耗的无功不一致, 所以就在原来的基础上对交流滤波器投切表进行了调整。由于新的分接开关策略在降压运行的极不启用, 所以陕北站无功投切表也调整为“1+1”模式。即常规运行对应一个无功投切表, 降压运行对应另一个, 依据直流电压自动进行切换。

同等条件下触发角越大, 系统消耗的无功就越多, 因此采用分接开关新策略时在某些极端工况下会出现系统无功不平衡状况。如触发角度大于 17.5° 或者交流电压由于故障突然升高, 同时无可交流滤波器, 则系统交换无功将失衡, 影响系统稳定。此时无功平衡需在极控中完成, 将触发角上限由 25° 下调为 17.5° , 以减少直流系统消耗无功。

图 4 为系统大角度运行且无滤波器可用时, 触发角度和分接开关调节过程录波。具体为: 直流系统输送功率 2 000 MW, 触发角在 24.7° 左右, 分接开关 24 档。此时启动“无可滤波器”条件, 按照既定策略极控将触发角由 24.7° 降为 15.3° 。由于触发角减小, 整流侧直流电压增大, 直流电流也随之增大, 为使直流电压、直流电流恒定维持在参考值, 分接开关也由 24 档降为 17 档, 同时, 系统交换无功减少 251 Mvar 达到平衡状态。

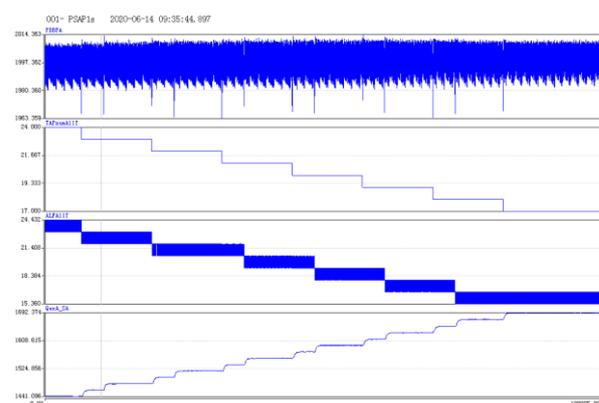


图 4 大角度运行且无滤波器可用

Fig. 4 TFR of no filter is available for large angle running

3 过压快切和闭锁快切

3.1 过压快切

文献[23]设计了基于滤波原则的快切滤波器策

略, 陕武工程无功控制策略中增加了相应的功能:

1) 最高稳态电压 $<U_{ac} \leq 1.1$ p.u. 时, 每隔 3 s 切除 1 小组交流滤波器, 直到当前功率下的绝对最小滤波器:

2) $U_{ac} > 1.1$ p.u., 每隔 8 s 切除 3 小组交流滤波器, 达到当前功率的绝对最小滤波器后, 如果过电压定值依然满足, 则每隔 8 s 切除 3 小组交流滤波器直到最小功率下的绝对最小滤波器, 最终由交流滤波器过电压保护动作;

3) $U_{ac} > 1.2$ p.u., 每隔 1 s 切除 3 小组交流滤波器, 达到当前功率的绝对最小滤波器后, 如果过电压定值依然满足, 则每隔 1 s 切除 3 小组交流滤波器直到最小功率下的绝对最小滤波器, 最终由交流滤波器过电压保护动作;

4) $U_{ac} > 1.3$ p.u., 每隔 250 ms 切除 3 小组交流滤波器, 达到当前功率的绝对最小滤波器后, 如果过电压定值依然满足, 则每隔 250 ms 切除 3 小组交流滤波器直到最小功率下的绝对最小滤波器, 最终由交流滤波器过电压保护或换流变过电压保护动作。

过压快切功能对于武汉换流站无论独立或合环运行时均需满足。

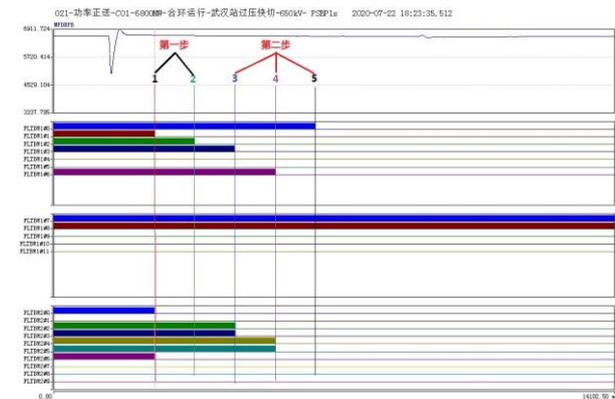


图 5 1.24 p.u. 过压快切试验录波

Fig. 5 TFR of 1.24 p.u. overvoltage resection test

过压快切的实现分两步: 第一步, 滤波器组切至当前功率对应的绝对最小滤波器个数; 第二步, 若电压仍满足快切条件, 则切至最小功率对应的绝对最小滤波器个数, 切除的原则就是每次切三组, 不足三组的切两组或者一组。图 5 为合环运行双极 6 400 MW 运行, 1.24 倍过压快切试验结果。通过录波文件可以看出, 试验前共投入 13 组交流滤波器, 过压快切共执行了 5 次, 其中第 1、2 次为步骤一, 第 3、4、5 次为步骤二。6 400 MW 对应绝对最小滤波器个数为 9 组, 第一步切除到剩余 9 组, 即需切掉 4 组, 切除原则为每次 3 组, 所以第一步

执行标注 1 和 2 的两小步, 第 1 次切除 3 组, 第 2 次切 1 组(不足 3 组的有几组切几组)。切除后交流电压仍满足 1.2 倍快切条件, 则切至最小功率对应的绝对最小滤波器个数——2 组。步骤二时需要切除 7 组, 按照切除原则, 分成了 3 次, 第一次 3 组, 第二次 3 组, 第三次 1 组。5 次切除时间间隔均为 1 s, 所有滤波器小组在 5 s 内完成了切除, 满足策略需求。当交流母线电压过高时, 可以通过快速切除交流滤波器组维持电压在安全范围之内。

3.2 紧急停运后快切滤波器

根据式(1), 对于送端交流系统较弱的直流线路大功率运行时, 投入交流滤波器组较多, 一旦发生紧急停运, 大量的盈余无功会流入交流系统, 造成近区交流电压急剧升高。

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{\sqrt{3}I_{SC}} \sin \varphi \quad (1)$$

式中: ΔU 为交流母线的线电压增加量; ΔQ 为滤波器无功容量; I_{SC} 为交流母线处的短路电流; φ 为交流电源的线电压和线电流相位差。

$$Q_{\text{filt}} = \sum \left(\frac{U_{ac}}{U_{acN}} \right)^2 \times Q_{\text{filtN}} \quad (2)$$

式中: Q_{filtN} 为交流滤波器额定容量; Q_{filt} 为交流滤波器实际容量; U_{acN} 为交流母线额定电压; U_{ac} 为交流母线实际电压。根据式(2)无功装置发出的无功功率与电压的平方成正比, 交流电压增大会使在投的无功装置发出更多的无功功率, 将加剧电压升高的速率。特别是对于新能源接入的陕北换流站, 电压升高会造成新能源设备脱网, 进一步影响送端电网频率、电压稳定运行, 甚至危害电力设备和送端电网安全^[24-26]。

针对此类状况, 陕武工程配置了紧急停运后快切滤波器策略, 并将快切细化为两部分: 单极闭锁快切和双极紧急停运快切。双极紧急停运后要求相对明确, 即在短时将投的交流滤波器组全部切除。根据成套设计要求, 双极紧急停运后在投交流滤波器需在 150 ms 内全部切除。

快切实现逻辑: 将滤波器预设一个投切顺序, 存入 FIFO 堆栈之中。正常滤波器投切, 按照预设顺序逐一选择(若不可用则自动选择下一个同类型滤波器组), 当前选择滤波器投入或者切除后, 自动选择下一组, 投切允许在堆栈中逐个开放。紧急停运后的快切则是将所有在投滤波器切除, 允许在堆栈中全部开放, 切除命令下发后能够全部出口, 完成滤波器切除。图 6 为双极 8 000 MW 闭锁后快切

滤波器录波, 从录波可以看出所有滤波器组在 150 ms 内被全部切除。

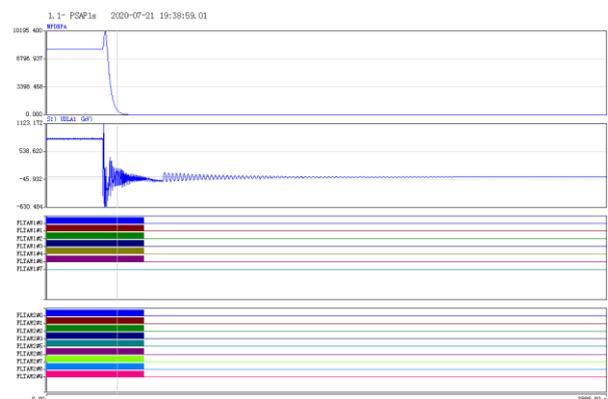


图 6 双极闭锁快切滤波器录波

Fig. 6 TFR of bipole block overvoltage resection test

单极紧急停运后的快切逻辑相比双极紧急停运就复杂的多。首先单极紧急停运快切后健全极要满足绝对最小和最小滤波器需求, 其次还需考虑闭锁之后的功率转带, 健全极按 2 h 过负荷能力计算功率损失(1.2 倍过负荷), 最后还需满足系统无功平衡需求。

此功能的实现逻辑公式为

$$N_{\text{cut}} = N_{\text{act}} - (N_{\text{abs}} + N_{\Delta Q}) \quad (3)$$

式中: N_{cut} 为要切除的滤波器数量; N_{act} 为在投的滤波器数量; $N_{\Delta Q}$ 为当前功率所对应的无功需求滤波器数量; N_{abs} 为当前功率所需的最小滤波器数量。其中 N_{abs} 个数考虑了闭锁后满足最小滤波器和绝对最小滤波器需求, 而 $N_{\Delta Q}$ 个数则考虑满足闭锁后的无功平衡需求。闭锁后系统无功功率用式(4)计算。

$$\Delta Q = \frac{P_{\text{after}}}{P_{\text{before}}} Q_{\text{before}} \quad (4)$$

式中: P_{before} 为闭锁前健全极的功率; P_{after} 为闭锁后健全极的功率; Q_{before} 为闭锁前系统无功功率。即根据闭锁前后的有功功率比例系数和闭锁前的无功功率折算闭锁后的无功功率。

图 7 为单极闭锁后快切滤波器录波, 试验工况为双极 8 000 MW 极 2 极母线差动保护闭锁, 录波显示闭锁后 140 ms 内切除 5 组滤波器, 健全极功率稳定在 4 800 MW(1.2 p.u.过负荷), 系统交换无功 171 Mvar(无功死区为 196 Mvar)。快切满足了时间、绝对最小滤波器、最小滤波器以及无功平衡的需求, 并能快速抑制交流系统电压升高。

3.3 后备无功控制

为避免两套直流站控死机后, 交流滤波器处于

不受控状态, 对交流电网频率、电压造成危害, 陕武工程增加了无功控制的后备策略, 其系统组成如

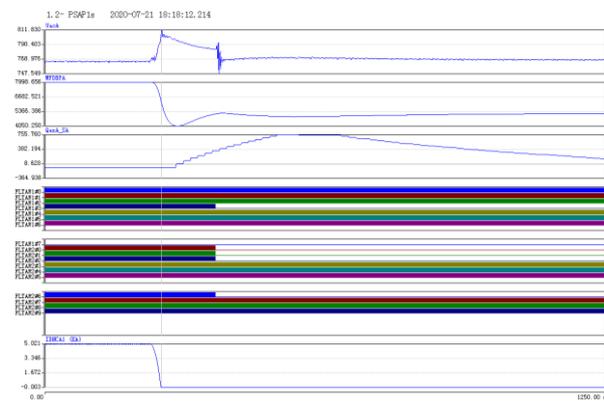


图 7 单极闭锁快切滤波器录波

Fig. 7 TFR of monopole block overvoltage resection test

图 8 所示。正常情况下, 直流站控 DCSC 通过现场总线(图 8 中红色线段)与滤波器控制装置 DFU420 通信, 采集交流滤波器的状态, 下发滤波器投切指令, 实现无功控制功能。

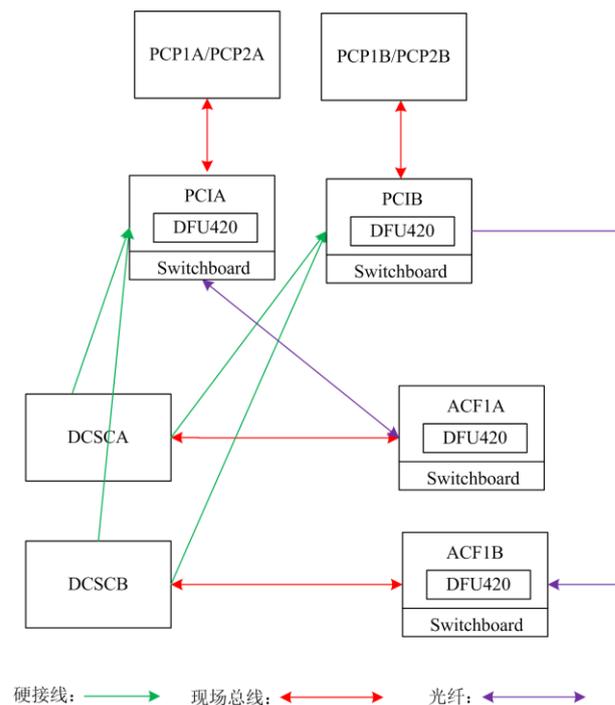


图 8 后备无功控制逻辑框图

Fig. 8 Logic diagram of backup reactive power control

直流站控主机可用信息通过硬接线(图 8 中绿色线段)送入极控接口屏 PCI, 直流站控正常运行时 PCI 处于备用状态, 当 PCI 收到两套直流站控主机运行状态信号均丢失后启动后备无功控制功能。DFU420 装置将采集滤波器信息通过本屏光交换机

(图 8 中紫色线段)送入 PCI 屏内, 并接收 PCI 下发的命令, 从而实现 PCI 对 ACF 的控制。同时, PCI 将 AFC 的状态通过现场总线送给极控 PCP, 由极控将交流滤波器的状态送到后台显示, 供运行人员监视。

后备无功作用时, PCI 屏内的 DFU420 装置只负责切除交流滤波器组, 目的是让交流母线电压运行在 1.05 p.u. 以下。当交流母线电压高于 1.05 p.u., 则延时 1 000 ms 开始切除一组滤波器, 高于 1.1 p.u. 时, 每隔 300 ms 切除一组滤波器, 直到交流母线电压降到 1.05 p.u. 以下, 极控在收到滤波器组的切除状态后, 根据配置的无功投切表启动降功率, 使功率水平和在投的滤波器组数相匹配。如果交流母线电压一直高于 1.05 p.u., 则持续切除滤波器, 直到只剩一组 A 类型, 一组 A 类型交流滤波器只能支撑单极运行, 所以在只剩 1 组 A 类型的情况下, 极控降功率同时闭锁 1 个极。闭锁原则为优先闭锁处于降压运行的极, 如果两组极都在常压运行则闭锁极 1。

图 9 为交流母线电压 1.05 p.u. 下的后备无功控制试验录波, 仿真模型为强系统, 即交流母线电压不随滤波器个数变化而变化, 所以在投的滤波器会持续切除, 录波显示切除间隔时间为 1 000 ms, 到只剩第一大组第 3 小组的 A 类型滤波器组。

同时极控系统降功率, 在只剩 1 组 A 类型滤波器组的情况下, 闭锁极 1。

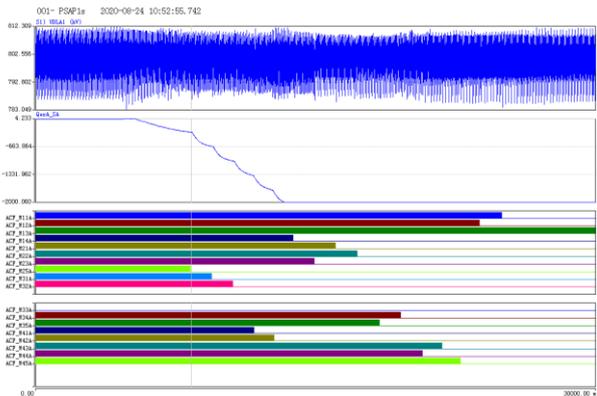


图 9 后备无功控制切除滤波器录波

Fig. 9 TFR of backup RPC resection AC filters

4 结论

系统仿真试验结果表明, 陕北站根据直流电压切换滤波器投切表, 武汉站根据独立或合环运行切换无功控制策略, 复杂、特殊工况下无功需求均能满足。新增加的过压快切、紧急停运后快切滤波器以及后备无功控制功能, 能够快速切除交流滤波器, 维持交流电压稳定, 避免损害一次设备。多段式、

多层次的无功控制能够有效应对直流工程中常见故障, 较以前工程保护策略的功能更全、范围更广。

根据系统试验结果来看, 目前无功控制还需要继续优化和完善的地方:

1) 通过上面的描述可知, 后备无功控制功能应对的是双套直流站控死机后, 交流滤波器母线电压升高的状况。它不像直流站控无功控制一样可以根据母线电压、无功功率等灵活地调节系统交换无功。后备无功控制作用时, 如果交流滤波器母线电压降低, 后备无功控制没有相应的应对措施。后续可以根据工程中应用的实际情况逐步做出改进, 根据交流母线电压变化, 实现滤波器投切功能。

2) 无功控制策略与调相机的配合。陕武工程武汉换流站远期还有两台 300 Mvar 调相机接入, 调相机建成后, 紧急停运或者交流母线电压升高情况下, 调相机作用与无功控制功能的配合还需要进行详细地研究和论证。

参考文献

[1] 郭龙, 刘崇茹, 负飞龙, 等. ± 1100 kV 直流系统分层接入方式下的功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 24-30.
GUO Long, LIU Chongru, YUN Feilong, et al. Power coordination control of ± 1100 kV UHVDC system with hierarchical connection mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 24-30.

[2] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.

[3] 吴彦维, 李晔, 陈大鹏, 等. 10 000 MW 特高压直流工程受端分层接入交流电网方式下直流控制系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 108-113.
WU Yanwei, LI Ye, CHEN Dapeng, et al. Research on control system for 10 000 MW UHVDC station B hierarchical connection to AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 108-113.

[4] 张文嘉, 蔡晖, 王国腾, 等. 分散接入式混合直流系统的机电暂态建模与控制策略研究[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 230-239.
ZHANG Wenjia, CAI Hui, WANG Guoteng, et al. Research on electromechanical transient modeling and control strategy of decentralized hybrid HVDC systems[J].

- High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 230-239.
- [5] 汤奕, 陈斌, 皮景创, 等. 特高压直流分层接入方式下受端交流系统接纳能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1790-1800.
- TANG Yi, CHEN Bin, PI Jingchuang, et al. Analysis on absorbing ability of receiving AC system for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1790-1800.
- [6] 许云飞, 金国锋, 刘阳, 等. 特高压交直流背景下电网外送电能力分析[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 33-37.
- XU Yunfei, JIN Guofeng, LIU Yang, et al. Outward transmission capacity analysis under the background of UHV AC/DC power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 33-37.
- [7] 李少华, 王秀丽, 张望, 等. 特高压直流分层接入交流电网方式下直流控制系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2409-2416.
- LI Shaohua, WANG Xiuli, ZHANG Wang, et al. Control system design for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2409-2416.
- [8] 杨欢欢, 朱林, 蔡泽祥, 等. 直流控制对直流系统无功动态特性的影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2631-2637.
- YANG Huanhuan, ZHU Lin, CAI Zexiang, et al. Influence of HVDC control on HVDC reactive power dynamic characteristic[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2631-2637.
- [9] BENSLIMANE A, BOUCHNAIF J, ESSOUFI M, et al. Comparative study of semiconductor power losses between CSI-based STATCOM and VSI-based STATCOM, both used for unbalance compensation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 56-69. DOI: 10.1186/s41601-019-0150-4.
- [10] 刘晓明, 慈文斌, 刘玉田. 直流控制方式对受端电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 69-77.
- LIU Xiaoming, CI Wenbin, LIU Yutian. Influence of DC system control mode on voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 69-77.
- [11] 郑超. 直流逆变站电压稳定测度指标及紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 344-352.
- ZHENG Chao. Voltage stability index of HVDC inverter station and emergency control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 344-352.
- [12] 李建勋, 王子强. 基于 LCC 换流器高压直流输电系统的无功功率控制监视方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(9): 19-24.
- LI Jianxun, WANG Ziqiang. Reactive power control monitoring method of HVDC transmission system based on LCC converter[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(9): 19-24.
- [13] 孙巍峰, 崔晨, 周晓风, 等. 调相机与特高压直流换流站交流滤波器的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 182-187.
- SUN Weifeng, CUI Chen, ZHOU Xiaofeng, et al. Coordinated control strategy for synchronous condenser and AC filter in UHVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 182-187.
- [14] 周贵勇, 郝俊芳, 王胜, 等. 一种直流输电无功控制功能优化策略及应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 181-187.
- ZHOU Guiyong, HAO Junfang, WANG Sheng, et al. Optimization strategy and application analysis of reactive power control function for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 181-187.
- [15] 刘洋, 邵广惠, 蒋维勇, 等. LCC-HVDC 背靠背系统降低电网短路电流应用研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 242-250.
- LIU Yang, SHAO Guanghui, JIANG Weiyong, et al. Application research of LCC-HVDC back-to-back system to reduce short circuit current of power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 242-250.
- [16] 尹纯亚, 李凤婷, 王丹东, 等. 风电高渗透率交直流外送系统直流闭锁稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 95-102.
- YIN Chunya, LI Fengting, WANG Dandong, et al. Research on stability control scheme for AC/DC hybrid transmission system with wind power high permeability under DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 95-102.
- [17] 邢超, 奚鑫泽, 李胜男, 等. 大容量 STATCOM 对于受端直流换流站运行与故障特性影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 78-85.
- XING Chao, XI Xinze, LI Shengnan, et al. Effect of large capacity STATCOM on operation and fault characteristics of receiving DC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 78-85.
- [18] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 21-28.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity

- synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 21-28.
- [19] 许国瑞, 范士雄, 罗超龙, 等. 用于直流换流站动态无功补偿的调相机与 SVC 运行特性对比[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2019, 46(1): 47-53.
XU Guorui, FAN Shixiong, LUO Chaolong, et al. Operation characteristic of synchronous condenser and SVC for dynamic reactive power compensation of DC converter station[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2019, 46(1): 47-53.
- [20] 孔祥平, 雷霄, 刘琳, 等. 输送风电的特高压直流频率调制和无功控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(7): 30-36.
KONG Xiangping, LEI Xiao, LIU Lin, et al. Adaptive frequency and reactive power control strategy of UHVDC system for large-scaled wind power transmission[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(7): 30-36.
- [21] 邹洪森, 惠子珈, 刘志远, 等. 直流送端换流站无功控制策略的优化研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(5): 66-73.
ZOU Hongsen, HUI Zijia, LIU Zhiyuan, et al. Study on optimization of reactive power control strategy for DC sending converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5): 66-73.
- [22] 胡宇林, 焦华, 严伟, 等. 从西换流站交流滤波器失谐特性分析[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 66-73.
HU Yulin, JIAO Hua, YAN Wei, et al. Analysis on detuning characteristic of AC filter in Congxi Converter Station[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 66-73.
- [23] 卢东斌, 薛海平, 沈全荣, 等. 基于滤波规则的 HVDC 交流过电压快切滤波器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 193-199.
LU Dongbin, XUE Haiping, SHEN Quanrong, et al. Filtering-rule-based control strategy of switching-off AC filters for over voltage in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 193-199.
- [24] 纪会争, 张帆, 康春雷, 等. 风火打捆直流送出系统电压稳定控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 126-132.
JI Huizheng, ZHANG Fan, KANG Chunlei, et al. Voltage stability control strategy of wind-thermal-bundled power generation and DC transmission system[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 126-132.
- [25] 骆悦, 姚骏, 张田, 等. 大规模风电直流外送系统单极闭锁场景下送端系统协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4108-4118.
LUO Yue, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Coordinated control strategy of large-scale wind power generation sending system under mono-polar block fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4108-4118.
- [26] 李凌, 卓毅鑫, 崔长江, 等. 考虑预测误差折现效应的风电场柔性并网策略[J]. 广东电力, 2020, 33(4): 25-33.
LI Ling, ZHUO Yixin, CUI Changjiang, et al. Flexible integration strategy of wind farm considering discount effect of prediction error[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(4): 25-33.

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2020-11-18

作者简介:

艾红杰(1983—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 主要从事直流输电控制保护系统研究开发; E-mail: xiaoi1983@163.com

黄金海(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事直流输电控制保护系统研究。E-mail: huangjinhaigood@163.com

(编辑 魏小丽)