

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.012

分层接入下绝对最小滤波器不满足回降功率策略研究

黄志岭, 邹强, 卢东斌

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:分层接入方式的特高压直流输电工程与常规直流特高压直流输电工程的明显差异之一是前者存在2个交流滤波器场,在绝对最小滤波器不满足功率回降、闭锁换流器等无功功率控制策略方面与常规特高压工程的无功功率控制策略差异较大。为了解决分层接入带来的绝对最小滤波器不满足回降直流功率协调控制问题,对分层侧的各种运行方式下出现绝对最小滤波器不满足回降直流功率的控制策略进行了研究,提出了通过控制模式转换、减少非故障电网被动功率损失量等措施,使得某一交流电网回降功率对另一交流电网影响最小,并在此基础上进行了RTDS仿真实验验证。仿真结果表明,所提的分层侧绝对最小滤波器不满足回降直流功率的策略可以较好地解决因分层接入带来的绝对滤波器不满足回降直流功率协调控制问题。

关键词:特高压直流;分层接入;无功功率控制;功率回降;控制模式转换

中图分类号:TM721.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)06-0084-09

0 引言

随着我国特高压直流技术的广泛应用,已出现多个多直流馈入的区域电网,如广东电网、华东电网等。为从电网结构上有效解决多馈入直流系统的问题,文献[1]提出一种特高压直流分层接入交流电网的方式,即特高压一个直流极串联的2个阀组分别接入500 kV交流电网和1 000 kV交流电网,认为分层接入方式可使系统从整体上具有较大的多馈入短路比和电压支撑能力;文献[2]对分层接入后的受端电网的接纳能力进行了分析,提出分层接入方式下受端系统强弱的量化判断标准;文献[3]介绍了特高压直流分层接入交流电网方式下直流控制系统设计,建议串联双阀组的中间配置直流电压测点,认为无功功率可以独立平衡;文献[4]分析了特高压直流分层接入下混联系统无功电压耦合特性,提出一种可判断高低端换流器同时发生换相失败可能性大小的方法;文献[5]分析了分层接入特高压的最大触发角控制策略,通过改进最大触发角控制减小换相失败发生概率;文献[6]研究分层接入的特高压直流基本控制策略,但对无功控制策略的研究不够深入;文献[7—8]证明了分层接入方式不仅能有效提高受端电网的多馈入短路比,而且具有良好的稳态及动态响应,提高特高压直流输电运行的可靠性;文献[9]根据系统容量和两受端电网的传输功率重新划分特高压直流的运行方式,建立了分层接入方式下特高压直流的潮流模型,推

导不同功率转移方案下直流系统参数的变化,对比其对电网潮流的影响;文献[10]分析分层接入方式下特高压直流系统的控制系统;文献[11]对有功功率协调控制进行了研究,提出了一种附加功率-电压控制器,有利于发挥分层接入方式下潮流分布可控的优势;文献[12]提出了直流分层接入方式下的电压稳定因子指标,分析了多种运行方式下受端系统的电压稳定性;文献[13]提出一种分层侧2个阀组电压平衡控制策略;文献[14]提出一种分极接入的方式,即两极分别接入不同电压等级电网的方式,为特高压直流输电的电网规划设计提供参考;文献[15—17]分别对特高压直流的阀区保护优化、退阀组引起的过电压问题、频率协调控制策略进行了研究;文献[18]提出了一种高低阀组分别采用电流源型换流器和电压源型换流器串联的特高压直流拓扑结构。

虽然国内学者对分层接入方式下的特高压直流输电系统进行了比较全面的研究,但是目前对分层接入方式的特高压无功功率控制策略研究相对较少。而无功功率控制是直流控制系统中一个非常重要的功能,值得进行详细研究分析,并制定一套适用于分层接入方式的无功功率控制策略。

文中提出了分层接入方式下绝对最小滤波器不满足回降功率基本的控制策略,对非对称运行方式下的绝对最小滤波器不满足回降直流功率的控制策略进行了理论分析。指出基本控制策略在某些特殊工况下存在的问题,并对该策略进行了优化,提出了适应不同运行工况的绝对最小滤波器回降直流功率完整的控制策略。

收稿日期:2019-06-27;修回日期:2019-08-22

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51607042)

1 分层接入方式及其对无功功率控制的影响

1.1 特高压直流分层接入方式

分层接入方式的特高压直流是指特高压直流单极串联的高、低压阀组分别接入不同交流电网的方式,如图 1 所示。

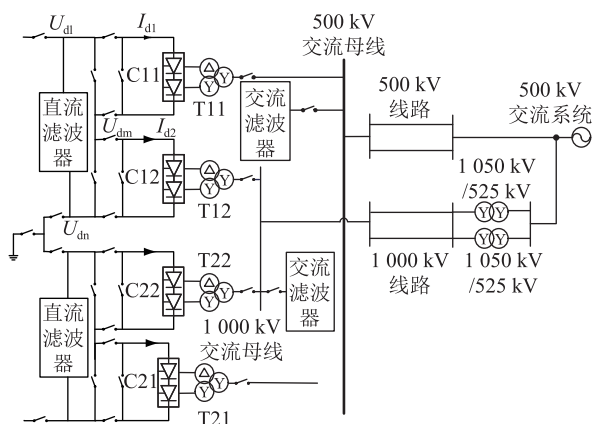


图 1 特高压直流分层接入交流电网

Fig.1 UHVDC with hierarchical connection to AC grid

以上海庙—山东±800 kV 特高压直流为例,山东侧高端换流变、低端换流变分别接入 500 kV 和 1 000 kV 电网,交流滤波器和无功补偿装置也分别接入 500 kV 和 1 000 kV 交流母线。

由于高压阀组所连接的换流变压器阀侧电压更高,如果其连接到 1 000 kV 交流电网,换流变压器的绝缘性能要求非常高;而低压阀组所连接的换流变压器阀侧电压较低,对换流变压器的绝缘性能要求相对偏低^[8]。因此,特高压直流分层接入方式采用高压阀组接入 500 kV 交流电网,低压阀组接入 1 000 kV 交流电网。

1.2 分层接入方式对无功功率控制策略的影响

从主回路拓扑上可以看出,分层接入方式的特高压直流输电工程的一个显著特点是在分层侧有 2 个独立的交流滤波器场。因此,在分接接入的直流控制系统中,针对 2 个交流滤波器场,配置了 2 个独立的无功功率控制功能模块,分别负责 2 个交流滤波器场的交流滤波器控制^[19]。

当某一交流电网的绝对最小滤波器不满足需要回降功率时,由于另一交流电网的换流器与需要回降功率的换流器串联,那么另一交流电网的输送功率也必然会同时回降。为了计算当前投入的交流滤波器所能满足的直流最大运行功率,分层接入的直流控制系统中配置了无功功率协调模块,用于计算绝对最小滤波器不满足时回降后的直流功率,

如图 2 所示。

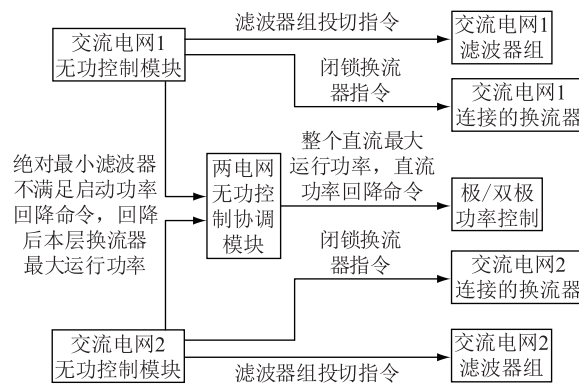


图 2 无功功率协调控制模块

Fig. 2 Reactive power coordination control function

由此可见,分层接入后不仅仅是在直流控制系统中要配置 2 个无功功率控制模块那么简单。当单个交流电网投入的交流滤波器不满足当前运行需求而启动直流功率回降功能时,与其串联的换流器也需要进行功率回降,这就需要在无功功率控制中增加无功功率协调控制模块用于计算整个直流系统回降后的功率指令值,给极/双极功率控制模块用于调整直流运行功率。

协调控制^[20]模块的控制策略直接影响直流输电系统的性能,在某一电网绝对最小滤波器不满足需要回降直流功率时,如何将另一电网的影响降到最小是非常重要的。文中将对协调控制模块的控制策略进行详细研究,提出一种当某一电网绝对最小滤波器不满足回降直流功率时对另一电网影响最小的控制策略。文中研究的约束前提是不考虑通过闭锁换流器的方式进行功率回降。

2 分层对称运行方式绝对最小滤波器不满足回降直流功率策略

分层侧双极所包含的 4 个换流器一共有 15 种运行方式,其中运行的换流器均属于同一交流电网的方式,即单层运行方式,共有 6 种。单层运行方式的绝对最小滤波器不满足回降功率策略不涉及与另一电网换流器协调问题,因此与常规特高压直流输电工程的策略一致,不再赘述。运行的换流器不属于同一交流电网的运行方式,即分层运行方式,共有 9 种。分层运行方式又分为对称运行方式和不

对称运行方式。分层对称运行方式是指分层侧运行的换流器不属于同一个交流电网,且双极运行的换流器接入 2 个交流电网数量一致,如图 3 所示。

常规的特高压直流输电工程中当绝对最小滤波器不满足时,根据当前投入的交流滤波器类型、

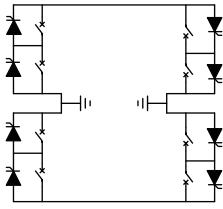


图3 对称运行方式

Fig.3 Symmetrical operation mode

组数查询绝对最小滤波器表计算当前投入的交流滤波器所能满足的最大运行功率。如当前实际运行功率超过滤波器所能满足的最大运行功率时,自动回降直流输电功率。

分层接入的特高压直流输工程中当一个电网的绝对最小滤波器不满足时,根据当前该电网投入的交流滤波器类型、组数查询该电网的绝对最小滤波器表,计算当前投入的交流滤波器所能满足的最大运行功率,送入无功功率协调控制模块,无功功率协调控制模块计算出整个直流的最大运行功率。如当前实际运行功率超过滤波器所能满足的最大运行功率时,自动回降直流输电功率。

分层侧对称运行时,由于2个电网的换流器串联且数目一致,此时的功率回降策略相对简单,2个电网只能同时回降。

假设500 kV电网当前投入的交流滤波器所能满足的本层换流器直流运行功率为 P'_{V1} ,1000 kV电网当前投入的交流滤波器所能满足的本层换流器直流运行功率为 P'_{V2} 。那么两极高端换流器允许运行的最大直流电流分别为:

$$I'_{V11} = \frac{P_{V11}}{P_{V11} + P_{V21}} \times P'_{V1} \times \frac{1}{U_{V11}} \quad (1)$$

$$I'_{V21} = \frac{P_{V21}}{P_{V11} + P_{V21}} \times P'_{V1} \times \frac{1}{U_{V21}} \quad (2)$$

式中: P_{V11} 为极1高端阀组当前运行功率; P_{V21} 为极2高端阀组当前运行功率; U_{V11} 为极1高端阀组当前运行直流电压; U_{V21} 为极2高端阀组当前运行直流电压。两极低端换流器允许运行的最大直流电流分别为:

$$I'_{V12} = \frac{P_{V12}}{P_{V12} + P_{V22}} \times P'_{V2} \times \frac{1}{U_{V12}} \quad (3)$$

$$I'_{V22} = \frac{P_{V22}}{P_{V12} + P_{V22}} \times P'_{V2} \times \frac{1}{U_{V22}} \quad (4)$$

式中: P_{V12} 为极1低端阀组当前运行功率; P_{V22} 为极2低端阀组当前运行功率; U_{V12} 为极1低端阀组当前运行直流电压; U_{V22} 为极2低端阀组当前运行直流电压。

由于高端换流器与低端换流器串联,两极允许

的运行直流电流分别为:

$$I'_1 = \min(I'_{V11}, I'_{V12}) \quad (5)$$

$$I'_2 = \min(I'_{V21}, I'_{V22}) \quad (6)$$

两极允许运行的直流功率分别为:

$$P'_1 = I'_1 \times (U_{V11} + U_{V12}) \quad (7)$$

$$P'_2 = I'_2 \times (U_{V21} + U_{V22}) \quad (8)$$

经过无功功率协调模块计算后输出的双极大运行功率指令值为:

$$P'_{BP} = P'_1 + P'_2 \quad (9)$$

以下对分层侧四阀组对称运行,500 kV电网发生绝对最小滤波器不满足回降直流功率时,对双极直流功率损失量、500 kV电网功率损失量、1000 kV电网功率损失量进行分析。

假设回降前500 kV电网输送功率为 P_{V1} ,由500 kV电网绝对最小滤波器投切表中可以查出回降后500 kV电网输送功率为 P'_{V1} ,则500 kV电网功率损失量为 $\Delta P_{ac1} = P_{V1} - P'_{V1}$,1000 kV电网功率损失量为 $\Delta P_{ac2} = \Delta P_{ac1}$,双极直流功率损失量为 $\Delta P_{dc} = 2\Delta P_{ac1}$ 。

3 分层不对称运行方式绝对最小滤波器不满足回降直流功率策略

分层不对称运行方式是指直流系统的2个极运行的换流器所接电网不一致或运行的换流器数目不一致,如图4所示。

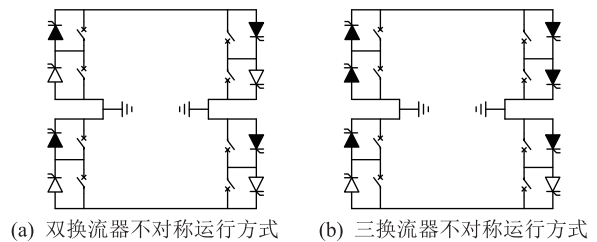


图4 不对称运行方式

Fig.4 Dissymmetrical operation mode

3.1 双换流器不对称运行方式

双换流器不对称运行方式如图4(a)所示,每个极上只有一个换流器运行且连接在不同电网上,假设当500 kV电网出现绝对最小滤波器不满足时,由于极2没有500 kV电网换流器运行,如仍按照第2节所述无功协调控制模块计算得到的回降后双极直流运行功率指令为:

$$P_{BP} = P'_{V1} + P_2 \quad (10)$$

式中: P_2 为极2当前运行功率,回降前后保持一致。

然而,当双极均在双极功率控制时,由于双极均是单阀组运行双极直流电压相等,因此回降前的双极实际运行功率相等,即:

$$P_1 = P_2 \quad (11)$$

回降后双极功率指令值由式(10)计算得出,因双极均是双极功率控制的原因,回降后2个极的功率仍然是相等的,那么每个极实际运行的功率为:

$$P'_1 = P'_2 = \frac{1}{2}(P'_{V1} + P_2) = P_1 - \frac{1}{2}\Delta P_{ac1} \quad (12)$$

可以看出,每个极承担了一半的回降量,导致回降后极1高端换流器的实际运行功率会大于 P'_{V1} ,即500 kV电网绝对最小滤波器仍不满足。解决这个问题有如下2个控制策略。

策略 I: 双极均保持在双极功率控制不变,继续回降功率,直到极1运行功率回降到 P'_{V1} 为止。假设回降前500 kV电网输送功率为 P_{V1} ,由500 kV电网绝对最小滤波器投切表中查出回降后500 kV电网输送功率为 P'_{V1} ,则 $\Delta P_{ac1} = P_{V1} - P'_{V1}$, $\Delta P_{ac2} = \Delta P_{ac1}$, $\Delta P_{dc} = 2\Delta P_{ac1}$ 。

策略 II: 将极1切换为单极功率控制,所有回降量均由极1承担。假设回降前500 kV电网输送功率为 P_{V1} ,由500 kV电网绝对最小滤波器投切表中查出回降后500 kV电网输送功率为 P'_{V1} ,则 $\Delta P_{ac1} = P_{V1} - P'_{V1}$, $\Delta P_{ac2} = 0$, $\Delta P_{dc} = \Delta P_{ac1}$ 。

上述2种控制策略的 ΔP_{ac1} , ΔP_{ac2} , ΔP_{dc} 对比如表1所示。

表1 2种无功功率控制策略对比
Table 1 Comparisons of two reactive power control strategies

功率变化量	策略 I	策略 II
ΔP_{ac1}	$P_{V1} - P'_{V1}$	$P_{V1} - P'_{V1}$
ΔP_{ac2}	$P_{V1} - P'_{V1}$	0
ΔP_{dc}	$2(P_{V1} - P'_{V1})$	$P_{V1} - P'_{V1}$

从表1可以看出,策略I的优点是不改变原有的控制模式,如双极均在双极功率控制模式,此时接地极平衡运行,接地极入地电流最小;缺点是功率损失量大。策略II的优点是所有功率损失量只由绝对最小滤波器不满足所在交流电网换流器承担,另一交流电网功率保持不变,功率损失量最小;缺点是改变了原有的控制模式,双极不平衡运行,接地极电流不平衡。而直流输电工程在接地极设计时,一般远离燃气管道、地震监测点等对入地电流比较敏感的场所,允许短时的接地极电流运行。由于绝对最小滤波器不满足回降直流功率为短时电网故障,需要优先考虑尽可能少的回降功率,再兼顾接地极电流。

综上所述,策略II明显优于策略I,因此在双换流器不平衡运行时的控制策略为:将需要进行功

率回降的换流器所在极切换为单极功率控制,双极功率总指令和单极功率指令同时更新,所有回降量均由绝对最小滤波器不满足的换流器承担。

3.2 三换流器不对称运行方式

三换流器不对称运行方式如图4(b)所示,一极全阀组运行,另一极单阀组运行。此时,一个电网有2个换流器运行,另一个电网只有一个换流器运行,2个电网发生绝对最小滤波器不满足回降直流功率时策略不尽相同,需分别研究。三换流器运行方式还有另外3种,对控制策略研究没有影响不一列出。

3.2.1 单换流器运行电网

以图4(b)所示为例,即500 kV电网发生绝对最小滤波器不满足需要回降直流功率时,由于极2高端换流器没有运行,当500 kV电网损失量是 ΔP_{ac1} 时,极1由于是双换流器运行,1000 kV电网损失量也是 ΔP_{ac1} 。因此通过第2节所述无功功率协调模块计算出的回降后总的直流功率指令为:

$$P_{BP} = P_1 - 2\Delta P_{ac1} + P_2 \quad (13)$$

式中: P_1 为极1当前运行功率; ΔP_{ac1} 为500 kV网功率损失量, $\Delta P_{ac1} = P_{V1} - P'_{V1}$; P_2 为极2当前运行功率,回降前后保持一致。

然而,当双极均在双极功率控制,且全压运行时,由于极1是全阀组运行,极2是单阀组运行,回降前极1直流功率是极2直流功率的2倍,回降后双极功率指令值由式(13)计算得出。因双极均为双极功率控制的原因,回降后极1直流功率仍然是极2直流功率的2倍,因此每个极的实际运行功率为:

$$P'_1 = \frac{2}{3}(P_1 - 2\Delta P_{ac1} + P_2) = P_1 - \frac{4}{3}\Delta P_{ac1} \quad (14)$$

$$P'_2 = \frac{1}{3}(P_1 - 2\Delta P_{ac1} + P_2) = P_2 - \frac{2}{3}\Delta P_{ac1} \quad (15)$$

由于极1是双阀组运行,那么500 kV网实际运行功率为极1的一半,因此500 kV网回降后的运行功率为:

$$P''_{V1} = \frac{1}{2} \left(P_1 - \frac{4}{3}\Delta P_{ac1} \right) = P_{V1} - \frac{2}{3}\Delta P_{ac1} \quad (16)$$

由式(16)可知,按照原有控制方式回降后极1高端实际运行功率大于绝对最小滤波器投切表中当前允许运行的功率 P'_{V1} ,即500 kV电网绝对最小滤波器仍不满足。为解决这个问题有如下3个控制策略。

策略 I: 双极均保持在双极功率控制不变,继续回降功率。假设回降前500 kV电网输送功率为

P_{V1} , 由 500 kV 电网绝对最小滤波器投切表中查出回降后 500 kV 电网输送功率为 P'_{V1} , 则 $\Delta P_{ac1} = P_{V1} - P'_{V1}$, 1 000 kV 电网有 2 个换流器运行, 因此 $\Delta P_{ac2} = 2\Delta P_{ac1}$, $\Delta P_{dc} = 3\Delta P_{ac1}$ 。

策略 II: 将电网极 1 切换为单极功率控制, 所有回降量均由极 1 承担。假设回降前 500 kV 电网输送功率为 P_{V1} , 由 500 kV 电网绝对最小滤波器投切表中查出回降后 500 kV 电网输送功率为 P'_{V1} , 则 $\Delta P_{ac1} = P_{V1} - P'_{V1}$, 切换控制方式后, 1 000 kV 电网极 2 的换流器不需要跟着回降功率, 因此 $\Delta P_{ac2} = \Delta P_{ac1}$, $\Delta P_{dc} = 2\Delta P_{ac1}$ 。

策略 III: 将极 1 切换为单极功率控制, 所有回降量均由极 1 承担, 极 1 的低端阀组因串联导致的功率回降损失量由极 2 低端阀组补偿。假设回降前 500 kV 电网输送功率为 P_{V1} , 由 500 kV 电网绝对最小滤波器投切表中查出回降后 500 kV 电网输送功率为 P'_{V1} , 则 $\Delta P_{ac1} = P_{V1} - P'_{V1}$, ΔP_{ac2} 为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ac2} = 0 & (P_{V22N} - P_{V22}) \geq \Delta P_{ac1} \\ \Delta P_{ac2} = \Delta P_{ac1} - (P_{V22N} - P_{V22}) & (P_{V22N} - P_{V22}) < \Delta P_{ac1} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_{V22N} 为极 2 低端换流器的额定运行功率; P_{V22} 为极 2 低端换流器当前运行功率。

当极 2 低端换流器可以完全转带极 1 低端换流器功率损失量时, $\Delta P_{ac2} = 0$; 当极 2 低端换流器不能完全转带极 1 低端换流器功率损失量时, $\Delta P_{ac2} = \Delta P_{ac1} - (P_{V22N} - P_{V22})$, ΔP_{dc} 为:

$$\begin{cases} \Delta P_{dc} = \Delta P_{ac1} & (P_{V22N} - P_{V22}) \geq \Delta P_{ac1} \\ \Delta P_{dc} = 2\Delta P_{ac1} - (P_{V22N} - P_{V22}) & (P_{V22N} - P_{V22}) < \Delta P_{ac1} \end{cases} \quad (18)$$

上述 3 种控制策略 ΔP_{ac1} , ΔP_{ac2} , ΔP_{dc} 的对比如表 2 所示。

表 2 3 种无功功率控制策略对比
Table 2 Comparisons of three reactive power control strategies

功率变化量	策略 I	策略 II	策略 III
ΔP_{ac1}	$P_{V1} - P'_{V1}$	$P_{V1} - P'_{V1}$	$P_{V1} - P'_{V1}$
ΔP_{ac2}	$2(P_{V1} - P'_{V1})$	$P_{V1} - P'_{V1}$	0 或 $(P_{V1} - P'_{V1}) - (P_{V22N} - P_{V22})$
ΔP_{dc}	$3(P_{V1} - P'_{V1})$	$2(P_{V1} - P'_{V1})$	$P_{V1} - P'_{V1}$ 或 $2(P_{V1} - P'_{V1}) - (P_{V22N} - P_{V22})$

从表 2 可以看出策略 I 的优点是不改变原有的控制模式, 在双极均在双极功率控制模式时接地极平衡运行, 接地极入地电流最小; 缺点是双极均在双极功率控制时功率损失量大。策略 II 的优点是

功率损失量较小; 缺点是改变了原有的控制模式, 双极不平衡运行, 接地极电流不平衡。策略 III 在策略 II 的基础上进行了优化, 功率损失量最小, 对另一电网的影响降到最小。

综上所述, 策略 III 最好, 因此在三换流器不平衡运行单换流器所在电网需要功率回降时的控制策略为: 将需要进行功率回降的换流器所在极切换为单极功率控制, 回降量由该极承担, 因换流器串联导致的另一电网的损失量由另一极的另一电网的换流器转带。

3.2.2 双换流器运行电网

仍以图 4(b) 所示为例, 双极均在双极功率控制且全压运行时, 1 000 kV 电网发生绝对最小滤波器不满足需要回降直流功率, 有 2 种控制策略。

策略 I: 按照第 2 节所述无功协调控制策略, 保持双极功率控制模式不变。假设回降前 1 000 kV 电网输送功率为 P_{V2} , 由 1 000 kV 电网绝对最小滤波器投切表中可以查出回降后 1 000 kV 电网输送功率为 P'_{V2} , 则 $\Delta P_{ac2} = P_{V2} - P'_{V2}$, $\Delta P_{ac1} = 1/2\Delta P_{ac2}$, $\Delta P_{dc} = 3/2\Delta P_{ac2}$ 。

策略 II: 极 2 只有 1 000 kV 电网的换流器运行, 将极 2 切换为单极功率控制, 先降极 2 的功率, 极 2 无法回降后再降极 1 的功率, 这样对 500 kV 电网的影响最小。假设回降前 1 000 kV 电网输送功率为 P_{V2} , 由 1 000 kV 电网绝对最小滤波器投切表中可以查出回降后 1 000 kV 电网输送功率为 P'_{V2} , 则 $\Delta P_{ac2} = P_{V2} - P'_{V2}$, ΔP_{ac1} 为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ac1} = 0 & (P_{V22} - 0.1P_{V22N}) \geq \Delta P_{ac2} \\ \Delta P_{ac1} = \Delta P_{ac2} - (P_{V22} - 0.1P_{V22N}) & (P_{V22} - 0.1P_{V22N}) < \Delta P_{ac2} \end{cases} \quad (19)$$

ΔP_{dc} 为:

$$\begin{cases} \Delta P_{dc} = \Delta P_{ac2} & (P_{V22} - 0.1P_{V22N}) \geq \Delta P_{ac2} \\ \Delta P_{dc} = 2\Delta P_{ac2} - (P_{V22} - 0.1P_{V22N}) & (P_{V22} - 0.1P_{V22N}) < \Delta P_{ac2} \end{cases} \quad (20)$$

上述 2 种控制策略 ΔP_{ac1} , ΔP_{ac2} , ΔP_{dc} 对比如表 3 所示。

从表 3 可以看出策略 I 的优点是不改变原有的控制模式, 在双极均在双极功率控制模式时接地极平衡运行, 接地极入地电流最小; 缺点是功率损失量大。策略 II 的优点是功率损失量最小, 对另一电网的影响降到最小; 缺点是改变了原有的控制模式, 双极不平衡运行, 接地极电流不平衡。

综上所述, 策略 II 较好, 因此在三换流器不平衡运行双换流器所在电网需要功率回降时的控制策略为: 将单换流器运行的极切换为单极功率控

表3 2种无功功率控制策略对比
Table 3 Comparisons of two reactive power control strategies

功率变化量	策略 I	策略 II
ΔP_{ac1}	$\frac{1}{2}(P_{V2} - P'_{V2})$	0 或 $(P_{V2} - P'_{V2}) - (P_{V22} - 0.1P_{V22N})$
ΔP_{ac2}	$P_{V2} - P'_{V2}$	$P_{V2} - P'_{V2}$
ΔP_{dc}	$\frac{3}{2}(P_{V2} - P'_{V2})$	$P_{V2} - P'_{V2}$ 或 $2(P_{V2} - P'_{V2}) - (P_{V22} - 0.1P_{V22N})$

制,优先回降单换流器运行极的功率,剩余需要回降的功率由双换流器运行的极承担。

4 仿真验证

为了解决分层接入带来的特殊无功功率控制问题需要对无功功率协调控制进行改进,改进后的逻辑如图5所示。

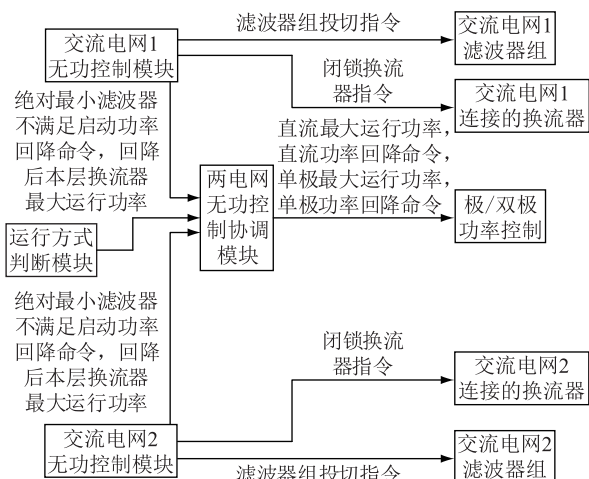


图5 优化后的无功功率协调控制模块

Fig.5 Optimized reactive power coordination control function

图5在图2所示无功功率协调控制模块上增加了运行方式判断模块,同时对无功功率协调控制模块进行了改进,改进后的无功功率控制模块根据当前阀组的运行方式选择不同的控制策略,当换流器单层运行或分层对称运行时,只输出直流最大运行功率和直流功率回降命令。当换流器分层不对称运行时,不需要单极回降的极输出直流最大运行功率和直流功率回降命令,极/双极功率控制模块根据收到的直流最大运行功率和直流回降命令更新双极功率指令;需要单极回降的极同时还输出单极最大运行功率和单极功率回降命令,极/双极功率控制模块根据收到的直流最大运行功率、直流回降命令、极最大运行功率、单极功率回降命令同时更新双极功率指令和单极功率指令。

改进后的无功功率协调控制模块可以满足各种运行方式下无功功率控制需求,使得某一电网因绝对最小滤波器不满足回降功率时对另一电网的影响最小。将上述研究成果在直流控制系统中实现并在RTDS仿真系统上进行仿真测试。

三阀组运行时,单一电网发生绝对最小滤波器不满足回降直流功率时控制策略最为复杂,因此文中挑选三阀组运行时进行了试验,验证控制策略的正确性。

特高压直流输电整流侧接入500 kV交流电网,逆变侧高、低压阀组分别接入500 kV、1 000 kV交流电网,即极1的高压阀组和极2的高压阀组接入500 kV交流电网,极1的低压阀组和极2的低压阀组接入1 000 kV交流电网,直流输电系统的参数如表4所示。

表4 分层接入方式的特高压直流输电系统参数(逆变侧)

Table 4 Specifications of UHVDC system with hierarchical connection mode (inverter)

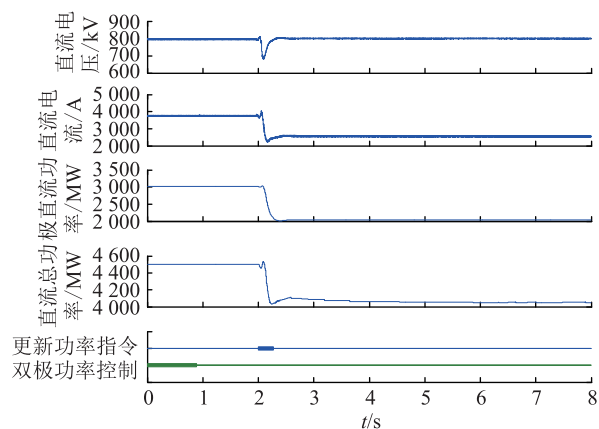
参数	数值
额定功率 P_{dN}/MW	10 000
额定电压 U_{dN}/kV	± 800
额定电流 I_{dN}/A	6 250
高压阀组额定空载直流电压 $U_{d0N,H}/kV$	226.01
低压阀组额定空载直流电压 $U_{d0N,L}/kV$	226.01
熄弧角参考值 $\gamma/(\circ)$	17
高压阀组相对感性压降 $d_{x,H}$	0.1
低压阀组相对感性压降 $d_{x,L}$	0.1

4.1 三换流器运行时单阀组运行电网绝对最小不满足回降直流功率

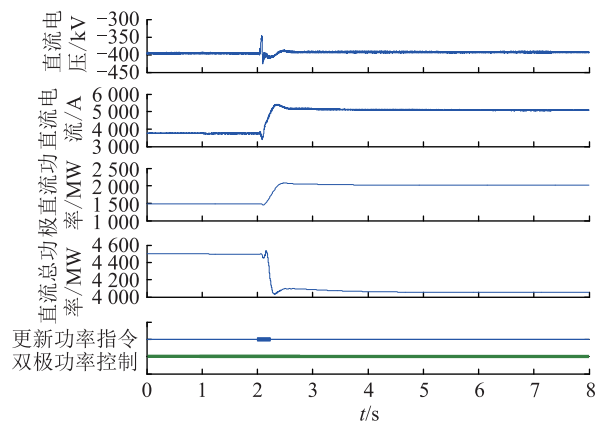
试验前工况:极1双换流器运行,极2高端(500 kV)换流器运行,双极均为双极功率控制,极1运行功率3 000 MW,极2运行功率1 500 MW,双极平衡运行,双极总功率4 500 MW,1 000 kV电网投入的绝对最小滤波器3组。

采用3.2.1节所述策略III,切除一组1 000 kV电网绝对最小滤波器后,试验波形如图6所示。

当1 000 kV电网绝对最小滤波器不满足需要回降直流功率时,将极1退出双极功率控制,只回降极1直流功率,可最大限度地降低对500 kV电网的影响。1 000 kV电网只有极1低端换流器运行,而极1高端阀组因与低端阀组串联,因此2个换流器同时回降,2个换流器的功率损失量均是500 MW,极1直流功率从3 000 MW回降到2 000 MW,极1直流损失量 ΔP_1 为1 000 MW;极2高端换流器转代了极1高端换流器的损失量500 MW,因此极2直流



(a) 极1仿真波形



(b) 极2仿真波形

图6 1 000 kV 电网绝对最小滤波器
不满足回降直流功率仿真结果

Fig.6 Power runback simulation results when absolute minimum filter of 1 000 kV grid is not fulfilled

功率由 1 500 MW 升至 2 000 MW。最终 $\Delta P_{ac1} = 0$, $\Delta P_{ac2} = 500$ MW, $\Delta P_{dc} = 500$ MW。

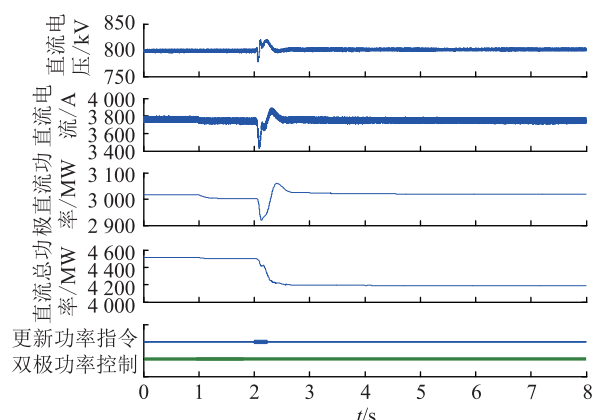
相同工况下采用 3.2.1 节所述策略 I 的仿真结果为 $\Delta P_{ac1} = 1\ 000$ MW, $\Delta P_{ac2} = 500$ MW, $\Delta P_{dc} = 1\ 500$ MW。

相同工况下采用 3.2.1 节所述策略 II 的仿真结果为 $\Delta P_{ac1} = 500$ MW, $\Delta P_{ac2} = 500$ MW, $\Delta P_{dc} = 1\ 000$ MW。

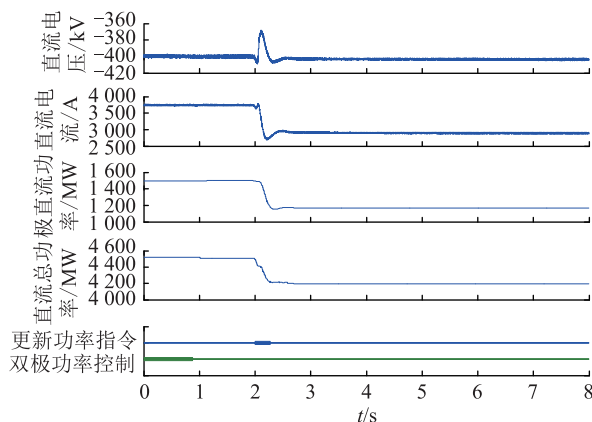
由仿真结果可见,采用 3.2.1 所述策略 III 后 1 000 kV 电网绝对最小滤波器不满足回降功率时对 500 kV 电网的影响最小。

4.2 三换流器运行时双阀组运行电网绝对最小不满足回降直流功率

试验前工况:极 1 双换流器运行,极 2 高端(500 kV)换流器运行,双极均为双极功率控制,极 1 运行功率 3 000 MW,极 2 运行功率 1 500 MW,双极平衡运行,双极总功率 4 500 MW,500 kV 网投入绝对最小滤波器 4 组。采用 3.2.2 节策略 II,切除一组 500 kV 网绝对最小滤波器后,试验波形如图 7 所示。



(a) 极1仿真波形



(b) 极2仿真波形

图7 500 kV 电网绝对最小滤波器
不满足回降直流功率仿真结果

Fig.7 Power runback simulation results when absolute minimum filter of 500 kV grid is not fulfilled

由仿真结果可见,当 500 kV 电网绝对最小滤波器不满足需要回降直流功率时,将极 2 退出双极功率控制,优先回降极 2 直流运行功率,极 2 功率降到最小运行功率后,500 kV 电网绝对最小滤波器仍不满足时才回降极 1 直流功率,这样可以最大限度地降低对 1 000 kV 电网的影响。回降后极 2 直流功率从 1 500 MW 回降到 1 167 MW,极 2 直流损失量为 333 MW;极 2 功率回降后 500 kV 电网绝对最小滤波器已经满足因此不需要回降极 1 直流功率。因此最终 $\Delta P_{ac1} = 333$ MW, $\Delta P_{ac2} = 0$, $\Delta P_{dc} = 333$ MW。

相同工况下使用 3.2.2 节所述策略 I 的仿真结果为 $\Delta P_{ac1} = 333$ MW, $\Delta P_{ac2} = 166.5$ MW, $\Delta P_{dc} = 499.5$ MW。

从仿真结果可以看出,采用 3.2.2 节所述策略 II 后 500 kV 电网绝对最小滤波器不满足回降功率时对 1 000 kV 电网的影响最小。

5 结语

根据分层接入的特高压直流输电特点,对分层

侧的绝对最小滤波器不满足回降直流功率控制策略进行了详细的研究并进行了仿真测试。

通过详细的 RTDS 仿真测试表明所提的分层侧的绝对最小滤波器不满足回降直流功率控制策略可以较好的解决因分层接入带来的绝对最小滤波器不满足回降直流功率时的一系列问题。

文中是不考虑通过闭锁换流器的方式进行功率回降的约束前提下进行研究的,仍有优化改善空间。后续可以继续研究当某一电网绝对最小滤波器不满足回降功率,因另一电网换流器串联导致回降的总直流功率大于绝对最小不满足所在电网某一换流器当前运行功率时通过闭锁换流器来进行功率回降的控制策略。这种控制策略可以将直流损失量和对另一电网的影响降到最小,但与控制方式和运行方式关联性较大,控制策略非常复杂。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 汤奕, 陈斌, 王琦, 等. 特高压直流分层接入下混联系统无功电压耦合特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1005-1011.
TANG Yi, CHEN Bin, WANG Qi, et al. Analysis on reactive power and voltage coupling characteristics of hybrid system for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1005-1011.
- [5] 卢东斌, 王永平, 王振曦, 等. 分层接入方式的特高压直流输电逆变侧最大触发延迟角控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1808-1816.
LU Dongbin, WANG Yongping, WANG Zhenxi, et al. Inverter maximum alpha control in UHVDC transmission with hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1808-1816.
- [6] 王永平, 卢东斌, 王振曦, 等. 适用于分层接入的特高压直流输电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 59-65.
WANG Yongping, LU Dongbing, WANG Zhenxi, et al. Study on control strategies applied to UHVDC with hierarchical connection mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 59-65.
- [7] 王玲, 文俊, 司瑞华, 等. UHVDC 分极分层接入方式及其运行特性[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 730-738.
WANG Ling, WEN Jun, SI Ruihua, et al. The connection mode and operation characteristics of UHVDC with hierarchical connection by pole[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2018, 33(4): 730-738.
- [8] 管永高, 张诗滔, 许文超. 特高压直流分层接入方式下层间交互影响研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 32-37.
GUAN Yonggao, ZHANG Shitao, XU Wenchao. Study on hierarchical interaction of UHVDC hierarchical connection mode[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 32-37.
- [9] 李生虎, 吴正阳, 黄杰杰, 等. 考虑非对称运行和受端分层接入的特高压直流潮流建模[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 40-44.
LI Shenghu, WU Zhengyang, HUANG Jiejie, et al. Power flow modeling for ultra-high voltage direct current considering unbalanced operation and receiving-end hierarchical integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 40-44.
- [10] 李越, 刘崇茹, 赵云灏, 等. 两种可适用于分层接入的特高压直流输电控制系统[J]. 现代电力, 2017, 34(5): 1-6.
LI Yue, LIU Chongru, ZHAO Yunhao, et al. Two types of UHVDC control system suitable for hierarchical connection to AC power grid[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(5): 1-6.
- [11] 郭龙, 刘崇茹, 俞飞龙, 等. ± 100 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 ± 100 kV UHVDC system with hierarchical connection mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 24-30.
- [12] 汤奕, 朱亮亮, 陈斌, 等. 特高压直流分层接入受端系统电压稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 35-41.
TANG Yi, ZHU Liangliang, CHEN Bin, et al. Analysis on voltage stability of receiving-end system with UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2018, 30(9): 35-41.
- [13] 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.

- [14] 王旌,韩民晓,姚蜀军,等. 特高压直流输电分极接入运行特性分析[J]. 电力建设, 2016, 37(10): 54-60.
WANG Jing, HAN Minxiao, YAO Shujun, et al. Operation characteristic analysis for UHVDC transmission in separating pole connection mode[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(10): 54-60.
- [15] 刘孝辉,赵森林,阮思焯,等. 受端分层特高压直流阀区保护优化策略[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2423-2428.
LIU Xiaohui, ZHAO Senlin, RUAN Siye, et al. Optimal strategies of valve protection of UHVDC with hierarchical connection structure[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2423-2428.
- [16] 俞翔,陈乐,邹强,等. 特高压直流单换流器退出引起过电压问题的分析及优化[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 145-150, 155.
YU Xiang, CHEN Le, ZOU Qiang, et al. Analysis and optimization of overvoltages in UHVDC project caused by exiting of converter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 145-150, 155.
- [17] 刘凯,张庆武,侍乔明. 灵绍±800 kV 特高压直流协调频率控制功能应用[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 14-20.
LIU Kai, ZHANG Qingwu, SHI Qiaoming. Application of coordinated frequency control function in Lingshao ±800 kV UHVDC project [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 14-20.
- [18] 邹强,马云龙,杨建明,等. 多端直流输电系统接地极拓扑研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 132-136.
ZOU Qiang, MA Yunlong, YANG Jianming, et al. Electrode topology research in series multi-terminal HVDC transmission system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 132-136.
- [19] 郝文斌,张振华,单浩东,等. 受端分层接入的特高压直流系统无功控制策略分析[J]. 山东电力技术, 2019, 46(2): 6-9.
HAO Wenbin, ZHANG Zhenhua, SHAN Haodong, et al. Reactive power control strategy analysis of UHVDC system with hierarchical access at the receiving end [J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(2): 6-9.
- [20] 熊永新,沈郁,姚伟,等. ±1 100 kV 特高压直流分层接入方式下改进附加功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3448-3456.
XIONG Yongxin, SHEN Yu, YAO Wei, et al. Improved additional power coordinated control of ±1 100 kV UHVDC system with hierarchical connection mode [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3448-3456.

作者简介:



黄志岭

黄志岭(1981),男,硕士,工程师,从事特高压直流输电控制系统研发工作(E-mail: huangzl@nrec.com);

邹强(1981),男,硕士,工程师,从事特高压直流输电控制系统研发工作;

卢东斌(1982),男,博士,高级工程师,从事特高压直流输电控制系统研发工作。

DC power runback control strategy for unfulfilled absolute minimum filter of UHVDC with hierarchical connection mode

HUANG Zhiling, ZOU Qiang, LU Dongbin

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: One of the obvious differences between the UHVDC with single-layer connection transmission project and the UHVDC with hierarchical connection mode transmission project is latter has two AC filter yard, which will make some differences between both connection mode's reactive power control strategy, such as DC power runback for unfulfilled ABSMIN filter and block converter for unfulfilled ABSMIN filter. In order to solve the DC power runback control problem for unfulfilled ABSMIN filter caused by UHVDC with hierarchical connection mode, the control strategy that DC power runback for unfulfilled ABSMIN filter in different operation modes of layered side is studied and some methods are proposed to reduce the impact of another normal AC grid, such as changing control mode and reducing power loss of normal layer. The control strategy test by RTDS simulation. The simulation results show that the control strategy can solve the DC power runback for unfulfilled ABSMIN filter control problems caused by UHVDC with hierarchical connection mode.

Keywords: ultra high-voltage direct current (UHVDC); hierarchical connection; reactive power control; power runback; change control mode

(编辑 钱悦)