

考虑线路电阻影响的 MMC-MTDC 自适应下垂控制

王少林^{1,3}, 王刚^{1,3}, 陈琦², 王晓磊^{1,3}, 王海龙^{1,3}, 杨金成^{1,3}, 刘鸿鹏²

(1. 国网新疆电力有限公司营销服务中心(资金集约中心、计量中心), 新疆 乌鲁木齐 830001; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 3. 智慧用能及能效服务数字物理混合仿真实验室, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要: 下垂控制因其对通信的要求不高、可靠性高而在多端柔性直流输电中广泛应用。但是传统的下垂控制中下垂系数固定, 尤其在系统功率波动较大时, 容易导致换流站过载, 并且直流线路上的电阻还会影响下垂控制换流站的有功功率分配。针对此类问题, 提出了一种考虑线路电阻影响的自适应下垂控制。首先, 分析在下垂控制下的多端柔性直流输电系统等效电路, 推导出考虑线路电阻影响的下垂系数整定方法。然后在整定方法中用换流站的功率裕度比取代固定的功率分配比例系数, 实现下垂系数的自适应调节。最后在 PLECS 上搭建仿真模型, 对不同工况进行仿真, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 多端柔性直流输电; 线路电阻; 有功功率分配; 功率裕度; 自适应下垂控制

An adaptive droop control method considering the influence of line resistance for MMC-MTDC

WANG Shaolin^{1,3}, WANG Gang^{1,3}, CHEN Qi², WANG Xiaolei^{1,3}, WANG Hailong^{1,3}, YANG Jincheng^{1,3}, LIU Hongpeng²

(1. Department of Power Marketing, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830001, China; 2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 3. Digital Physical Hybrid Simulation Laboratory for Intelligent Energy and Energy Efficiency Services, Urumqi 830001, China)

Abstract: Because of low demand on communication and its high reliability, droop control is widely used in multi-terminal high voltage direct current systems. However, in traditional droop control, the droop coefficient is fixed. When the power fluctuates greatly, it is easy for this to lead to overload of the converter station, and the DC line resistance will affect the active power-sharing of the converter. To prevent this, an adaptive droop control method considering the influence of line resistance is proposed. First, the equivalent circuit of multi-terminal high voltage direct current under droop control is analyzed, and the droop coefficient setting method considering the influence of line resistance is deduced. Then the fixed power ratio is replaced by the power margin ratio of the converter station in the setting method to realize the adaptive adjustment of the droop coefficient. Finally, a simulation model is built on PLECS to simulate different working conditions, and the effectiveness of the proposed control strategy is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077030).

Key words: multi-terminal high voltage direct current; line resistance; active power-sharing; power margin; adaptive droop control

0 引言

随着近年来大量可再生能源的开发和利用, 基于电压源型换流器(Voltage Sourced Converter, VSC)的高压柔性直流输电系统(High Voltage Direct Current,

HVDC)逐渐成为解决大规模新能源并网的关键手段之一^[1-7]。在两端柔性直流输电的基础上发展而来的多端柔性直流输电(Multi-terminal HVDC, MTDC)因其具有电力调度灵活、输电成本较低等优势, 在孤岛供电和海上风电并网以及远距离输电故障保护等领域具有良好的应用前景^[8-12]。

目前 MTDC 的基本控制方法主要有三种: 主从控制、电压裕度控制和下垂控制^[13-14]。下垂控制策略具有独特的优势, 其通过多个换流站同时承担直

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077030); 国网新疆电力有限公司科技项目资助“面向用户侧多端智能用电场景下的多能互动研究”(5230YX20001B)

流系统电压控制的任务, 对通信的要求不高, 系统的可靠性高, 因此在 MTDC 中广泛应用。但是其也存在固有缺陷, 传统的下垂控制采用的是换流站端口电压, 当系统出现功率波动时, 由于直流输电线路存在电阻, 会导致端口电压出现电压降落, 使得换流站的有功功率分配不准确, 甚至换流站出现过载问题, 导致整个系统崩溃。

针对此类问题, 文献[15]在下垂控制中引入一个公共电压参考值, 提高了系统的动态响应和故障穿越能力。文献[16]在考虑电压和功率偏差的基础上, 提出了一种附加滞后补偿调速器的自适应下垂控制, 提高了系统的稳定性和响应速度。文献[17]提出一种模糊下垂控制, 不仅能够减小直流电压偏差, 同时不会影响到其他控制方式下 VSC 站交直流变量的控制能力。文献[18]在自适应下垂控制中引入了直流电压偏差补偿器和对电流的预测模型, 实现了直流电压无差调节和内环电流的快速跟踪。文献[19-21]提出了一种基于换流站功率裕度的自适应下垂控制, 能够根据直流电压的大小, 实时改变下垂系数, 避免换流站出现过载, 但没有考虑线路电阻产生的压降对功率准确分配的影响。

本文以任意端并联多端柔性直流输电系统作为分析对象, 详细分析了线路电阻产生的压降对换流站分配功率的影响, 在此基础上又考虑换流站的功率裕度, 提出一种新型自适应下垂控制策略。所提方法不但能实现功率准确分配, 而且能够避免换流站过载。最后, 基于 PLECS 对所提控制策略进行了仿真验证。

1 MTDC 系统结构与控制

1.1 换流站系统结构

模块化多电平换流器^[22-23](Modular Multilevel Converter, MMC)因其开关损耗小、输出波形质量好等优势在 VSC-HVDC 和 MTDC 中得到广泛应用。

三相 MMC 的电路拓扑结构如图 1 所示, MMC 分为上下两个桥臂, 每个桥臂由 N 个子模块和一个桥臂电感 L_0 构成, u_{va}, u_{vb}, u_{vc} 是 MMC 输出的交流侧电压, U_{dc} 为 MMC 的直流侧电压。

并联的 MTDC 系统一般有两种接线方式^[24-25]: 一种是树枝型结构, 另外一种为环网型, 分别如图 2(a)和图 2(b)所示。相较于环网型, 树枝型线路上的直流潮流容易控制并且线路上的参数设计难度较小, 故本文以考虑线路电阻的树枝型 MMC-MTDC 系统作为研究对象, 各个换流站均通过直流线路连接到公共直流母线上, 如图 3 所示。

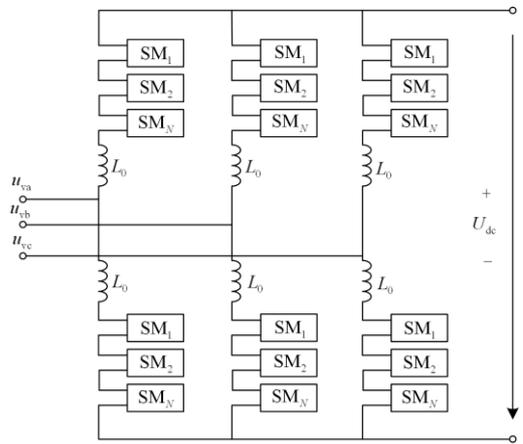


图 1 MMC 电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of MMC

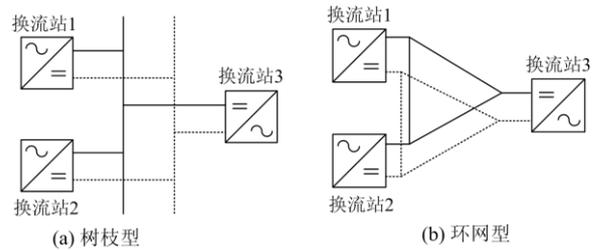


图 2 并联多端系统拓扑

Fig. 2 Topology of parallel connected MTDC

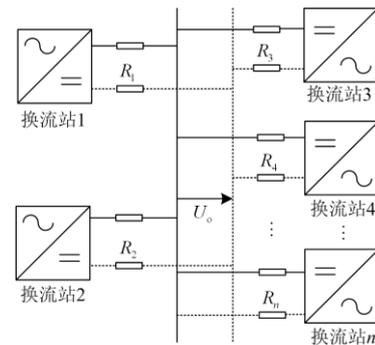


图 3 考虑线路电阻的并联 MMC-MTDC 系统

Fig. 3 Parallel MMC-MTDC system considering line resistance

1.2 MTDC 系统控制

换流站的控制框图如图 4 所示, 其中 AC 表示交流系统, R_{eq} 和 L_{eq} 分别表示换流站交流侧的等效电阻和等效电感, C_{dc} 表示 MMC 直流侧的等效电容, v_{ac} 和 i_{ac} 分别是从小网公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC) 处采样的交流侧电压和电流。

单个换流站的控制系统通常由双环构成, 电压外环和电流内环。电流内环基于同步旋转坐标系, 使

得 dq 轴电流 (i_d, i_q) 快速跟踪电流参考值 (i_{dref}, i_{qref}), 而电流参考值一般由电压外环产生。MMC 在两相旋转坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L_{eq} \frac{di_d}{dt} = -R_{eq} i_d + \omega L_{eq} i_q - v_{cd} + v_d \\ L_{eq} \frac{di_q}{dt} = -R_{eq} i_q - \omega L_{eq} i_d - v_{cq} + v_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d, i_q 为 dq 轴下电网电流; v_d, v_q 为 dq 轴下 PCC 处电压; v_{cd}, v_{cq} 为 dq 轴下换流器出口侧电压; ω 为电网电压矢量同步旋转角速度。

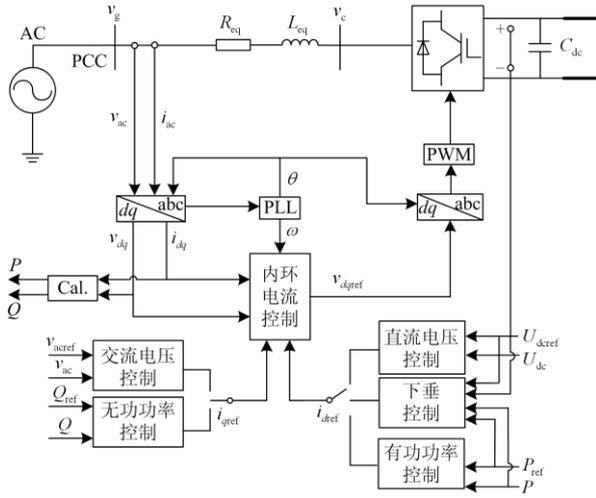


图4 换流站控制框图

Fig. 4 Control system of a converter station

2 下垂控制下线路电阻对功率分配的影响

2.1 传统下垂控制

MTDC 系统中传统下垂控制主要有两类: U-I 下垂^[26]和 U-P 下垂。U-I 和 U-P 下垂控制的原理如图 5 所示。基于 U-I 和 U-P 下垂控制的表达式为

$$\begin{cases} r_i = \frac{\Delta U_{dci}}{\Delta i_{dci}} = \frac{U_{dciref} - U_{dci}}{i_{dciref} - i_{dci}} \\ k_i = \frac{\Delta P_i}{\Delta U_{dci}} = \frac{P_{iref} - P_i}{U_{dciref} - U_{dci}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: r_i 和 k_i 分别为第 i 个换流站的 U-I 和 U-P 下垂系数; ΔU_{dci} 、 Δi_{dci} 和 ΔP_i 分别为第 i 个换流站的直流电压偏差、直流电流偏差和有功功率偏差; U_{dciref} 、 i_{dciref} 、 P_{iref} 分别为第 i 个换流站的直流电压参考值、直流电流参考值和有功功率参考值; U_{dci} 、 P_i 、 i_{dci} 分别为第 i 个换流站的直流电压实际值、有功功率实际值和直流电流实际值。

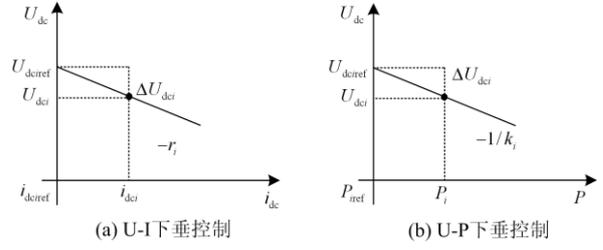


图5 U-I 和 U-P 下垂控制

Fig. 5 U-I and U-P droop control

2.2 线路电阻对下垂控制分配功率的影响

为了分析线路电阻与下垂系数之间的关系, 对图 3 所示的并联 MTDC 系统进行分析, 其中换流站 1 和换流站 2 采用定有功功率控制, 换流站 3 至换流站 n 采用 U-I 下垂控制策略, 并且将 U-I 下垂系数 r 等效为虚拟电阻, 系统等效电路如图 6 所示。其中, U_o 为公共直流母线电压, R_n 为第 n 个换流站所连接直流线路电阻。

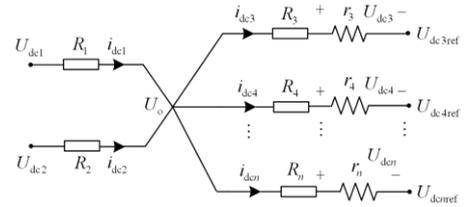


图6 基于 U-I 下垂控制的并联 MTDC 系统等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit of parallel MTDC system

under U-I droop control

对采用下垂控制策略的换流站 3, 4, ..., n 进行分析, 由图 6 可知:

$$\begin{cases} U_o = U_{dc3ref} + i_{dc3}(R_3 + r_3) \\ U_o = U_{dc4ref} + i_{dc4}(R_4 + r_4) \\ \vdots \\ U_o = U_{dcnref} + i_{dcn}(R_n + r_n) \end{cases} \quad (3)$$

其中, 采用下垂控制换流站的实际电压和参考电压之间的关系如式(4)所示。

$$\begin{cases} U_{dc3} = r_3 \cdot i_{dc3} + U_{dc3ref} \\ U_{dc4} = r_4 \cdot i_{dc4} + U_{dc4ref} \\ \vdots \\ U_{dcn} = r_n \cdot i_{dcn} + U_{dcnref} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知, 由下垂系数所引起的电压偏差如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta U_{dc3} = U_{dc3ref} - U_{dc3} = -r_3 \cdot i_{dc3} \\ \Delta U_{dc4} = U_{dc4ref} - U_{dc4} = -r_4 \cdot i_{dc4} \\ \vdots \\ \Delta U_{dcn} = U_{dcnref} - U_{dcn} = -r_n \cdot i_{dcn} \end{cases} \quad (5)$$

又因为

$$U_{dc3ref} = U_{dc4ref} = \dots = U_{dcnref} = U_{dceref} \quad (6)$$

联合式(6)和式(3)可知, 任意两个下垂控制换流站 i 和 j 的直流电流与等效电阻成反比。

$$\frac{i_{dci}}{i_{dcj}} = \frac{R_j + r_j}{R_i + r_i} \quad (7)$$

下垂控制换流站的有功功率表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} P_3 = (U_{dc3ref} + r_3 \cdot i_{dc3}) \cdot i_{dc3} \\ P_4 = (U_{dc4ref} + r_4 \cdot i_{dc4}) \cdot i_{dc4} \\ \vdots \\ P_n = (U_{dcnref} + r_n \cdot i_{dcn}) \cdot i_{dcn} \end{cases} \quad (8)$$

下垂控制作用下任意两个换流站 i 和 j 承担的功率偏差为

$$\Delta P_{ij} = P_i - P_j = U_{dceref} \left[\frac{i_{dci} [(R_j + r_j) - (R_i + r_i)]}{R_j + r_j} \right] + i_{dci}^2 \left[\frac{r_i (R_j + r_j)^2 - r_j (R_i + r_i)^2}{(R_j + r_j)^2} \right] \quad (9)$$

由式(9)可得, 当 $R_i = R_j$, $r_i = r_j$ 时, $\Delta P_{ij} = 0$, 任意两个换流站承担相同的不平衡功率, 即此时系统的动态功率被下垂控制换流站均分。而在实际工程中下垂换流站所连接的直流线路电阻很难相同, 因此线路电阻导致功率分配不准确。

3 考虑线路电阻的自适应下垂控制

当换流站采用 U-P 下垂控制时, 下垂换流站所承担的额外功率可以用式(10)表示。

$$\Delta P_i = (U_{dceref} + \Delta U_{dci})(i_{dciref} + \Delta i_{dci}) - U_{dceref} i_{dciref} \quad (10)$$

忽略式中的二阶偏差, 式(10)可以转化为

$$\Delta P_i = \Delta U_{dci} \cdot i_{dciref} + U_{dceref} \cdot \Delta i_{dci} = k_i \Delta U_{dci} \quad (11)$$

结合式(2)和式(11), 将 r_i 用 k_i 表示可得^[27]:

$$r_i = \frac{U_{dceref}}{k_i - i_{dciref}} \quad (12)$$

由式(11)可知, 基于 U-P 下垂控制的换流站所承担的不平衡功率比值为

$$\Delta P_3 : \Delta P_4 : \dots : \Delta P_n = k_3 \Delta U_{dc3} : k_4 \Delta U_{dc4} : \dots : k_n \Delta U_{dcn} \quad (13)$$

结合式(5)、式(7)、式(12), 可将式(13)重新整理为

$$\Delta P_3 : \Delta P_4 : \dots : \Delta P_n = k_3 : k_4 \frac{R_3(k_3 - i_{dc3ref}) + U_{dceref}}{R_4(k_4 - i_{dc4ref}) + U_{dceref}} \quad (14)$$

$$\dots : k_n \frac{R_3(k_3 - i_{dc3ref}) + U_{dceref}}{R_n(k_n - i_{dcnref}) + U_{dceref}} = D_3 : D_4 : \dots : D_n$$

式中, D_3, D_4, \dots, D_n 为系统动态功率分配系数。

由式(14)可知:

$$k_n = \frac{k_3 (U_{dceref} - i_{dc3ref})}{(D_3 / D_n) [R_3 (k_3 - i_{dc3ref}) + U_{dceref}] - R_n k_3} \quad (15)$$

由式(15)可知, 通过直流电压参考值 U_{dceref} 、直流电流初始值 i_{dceref} 和线路电阻, 就可以实现基于 U-P 下垂控制的有功功率按比例系数准确分配。但是功率分配比例系数 $D_3 : D_4 : \dots : D_n$ 一般为固定值, 若选取不当, 容易导致换流站过载, 因此为了防止单个换流站过载影响系统运行, 在考虑功率裕度的前提下提出一种自适应下垂控制。

换流站的直流电压偏差表达式为

$$\Delta U_{dci} = U_{dciref} - U_{dc} \quad (16)$$

换流站承受的最大功率可表示为

$$\Delta P_{i\max} = \begin{cases} P_{i\max} + P_i (\Delta U_{dci} < 0) \\ P_{i\max} - P_i (\Delta U_{dci} > 0) \end{cases} \quad (17)$$

则下垂控制作用下换流站之间的功率裕度比值为

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{P_{3\max} + P_3}{P_{i\max} + P_i} \quad (i = 4, 5, \dots, n), (\Delta U_{dc} < 0) \\ \alpha_j = \frac{P_{3\max} - P_3}{P_{j\max} - P_j} \quad (j = 4, 5, \dots, n), (\Delta U_{dc} > 0) \end{cases} \quad (18)$$

当计及换流站的功率裕度, 可根据式(15)、式(18)得到换流站的新下垂系数。

$$k_n = \begin{cases} \frac{k_3 (U_{dceref} - i_{dcnref})}{\alpha_i [R_3 (k_3 - i_{dc3ref}) + U_{dceref}] - R_n k_3}, \Delta U_{dc} < -\beta \\ \text{保持不变} & -\beta \leq \Delta U_{dc} \leq \beta \\ \frac{k_3 (U_{dceref} - i_{dcnref})}{\alpha_j [R_3 (k_3 - i_{dc3ref}) + U_{dceref}] - R_n k_3}, \Delta U_{dc} > \beta \end{cases} \quad (19)$$

式中, β 是为了防止下垂系数频繁改变而引入的滞环环宽, 其中 β 一般较小, 本文取 0.02。图 7 为换流站自适应下垂控制框图。

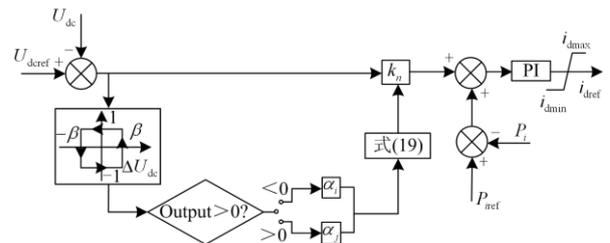


图 7 自适应下垂控制框图

Fig. 7 Adaptive droop control system

当系统的功率出现不平衡时, 直流电压的波动值在环宽以内时, 下垂系数保持不变; 直流电压处于下降状态, 若下降的幅度大于环宽, 换流站以

$P_{imax}-P_i$ 作为功率裕度改变下垂系数来增大功率,使系统功率达到平衡;直流电压处于上升状态,若上升的幅度大于环宽,换流站以 $P_{imax}+P_i$ 作为功率裕度改变下垂系数来减小功率,使系统功率达到平衡,因此降低了换流站出现过载的几率。除此之外,还在下垂系数中考虑了线路电阻的影响,保证了换流站分配功率时的准确性。

4 仿真结果及分析

为了验证所提方法的有效性,本文在 PLECS 上参考图 3 搭建了四端柔性直流输电系统。在仿真中,换流站 1 和换流站 3 的容量为 400 MW,换流站 2 和换流站 4 的容量为 300 MW。定义换流站 1、2、3 和 4 所在直流线路的长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 。另外,换流站 1 和换流站 2 采用定有功功率控制,换流站 3 和换流站 4 采用下垂控制策略。系统的仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

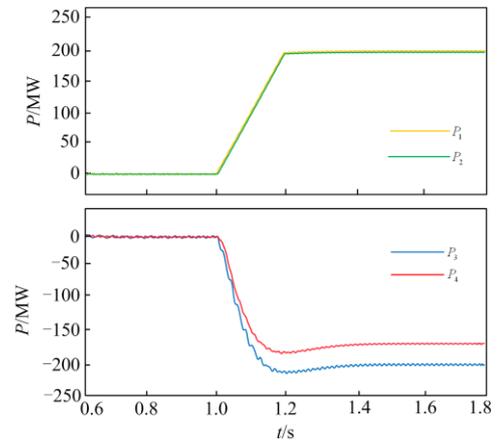
Table 1 Parameters of MTDC system

系统参数	数值
交流侧线电压/kV	220
交流侧等效电阻/ Ω	0.1
交流侧等效电感/mH	2
额定直流电压参考值/kV	400
直流电缆电阻/ (Ω/km)	0.01
直流电缆电感/ (mH/km)	0.16
直流电缆电容/ $(\mu\text{F}/\text{km})$	0.23
换流站 1 线路长度/km	200
换流站 2 线路长度/km	200
换流站 3 线路长度/km	0
换流站 4 线路长度/km	200

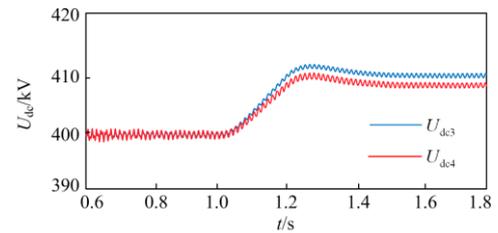
4.1 算例 1: 线路电阻影响

假设 4 个换流站的初始有功功率参考值为 0 MW,此时各换流站之间不传输功率,各个换流站的端口直流电压 U_{dc} 为 400 kV,直流电流参考值 i_{dcref} 为 0 kA。由表 1 可知换流站 3 线路上的电阻为 0Ω ,换流站 4 线路上电阻为 2Ω 。选取初始下垂系数 $k_3 = k_4 = 20 \text{ MW/kV}$ 。在 1 s 时换流站 1 和换流站 2 的功率分别波动到 200 MW,传统下垂控制和考虑线路电阻的下垂控制的仿真结果分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8(a)可以看出,当采用传统下垂控制时,虽然换流站 3 和换流站 4 的下垂系数相同,但是由于线路上电阻的存在,使得换流站 4 承担功率较小,为 -183 MW ,而换流站 3 承担功率较大,为 -216 MW ,两者所承担系统的动态功率不同。当采用基于功率准确分配的下垂控制时,由图 9(a)可以看出,当功率出现波动,两个换流站所承担的功率



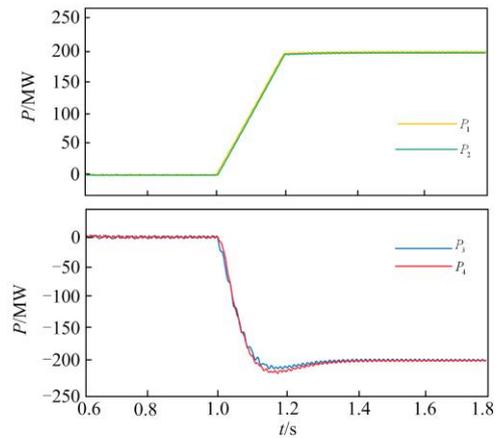
(a) 换流站有功功率变化波形



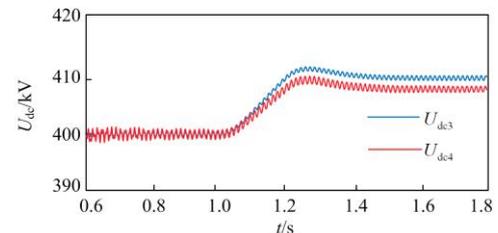
(b) 换流站3和4直流电压变化波形

图 8 传统下垂控制仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of the traditional droop control



(a) 换流站有功功率变化波形



(b) 换流站3和4直流电压变化波形

图 9 考虑线路电阻的下垂控制仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of droop control considering line resistance

相同, 均为 200 MW, 实现功率的准确分配。根据图 8(b)和图 9(b)可知, 线路电阻的存在导致换流站 4 的直流电压低于换流站 3 的直流电压, 但是直流电压波动值均在允许的范围内。

4.2 算例 2: 功率波动

由算例 1 可知, 通过式(15)调节下垂系数可以实现功率的准确分配, 但仍是采用固定的功率比例系数, 本算例将通过式(19)实现基于功率准确分配的自适应下垂控制, 用换流站的功率裕度比来替代固定的功率比例系数, 仿真结果如图 10 所示。

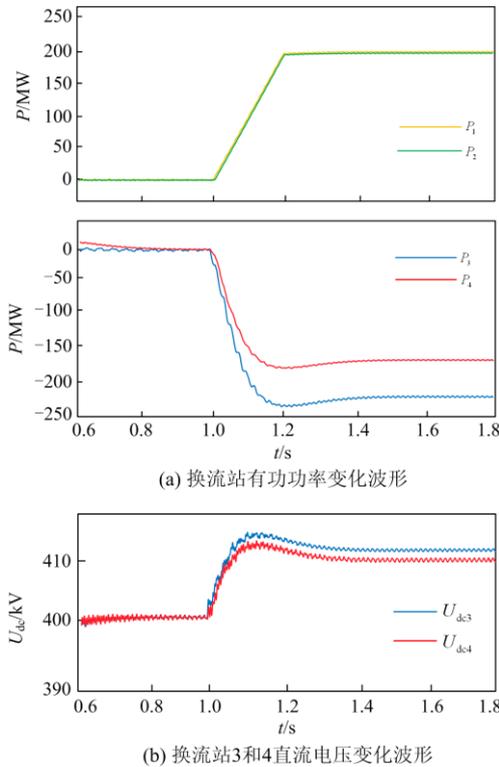


图 10 功率波动仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms in case of power fluctuation

系统的初始状态与算例 1 相同, 1 s 时换流站 1 和换流站 2 的功率变为 200 MW。由图 10 可以看出, 当换流站 1 和换流站 2 的功率变为 200 MW 时, 直流电压上升, 换流站 3 和换流站 4 开始承担不平衡功率, 由于换流站 3 的功率裕度大于换流站 4 的功率裕度, 所以换流站 3 所承担的功率要大于换流站 4 所承担的功率, 此时换流站 3 的功率变为 -228 MW, 换流站 4 的功率变为 -171 MW。并且由式(18)可知此时 $\alpha = 4/3$, 换流站所承担的功率同样满足换流站的功率裕度比, 在考虑电阻的同时, 实现功率的准确分配。换流站 3 端口电压为 411 kV, 换流站 4 端口电压为 410 kV, 电压上升值保持在允许的范围内。

4.3 算例 3: 潮流反转

系统的具体参数同算例 1, 1 s 时换流站 1 和换流站 2 的功率变为 200 MW, 2 s 时换流站的功率由 200 MW 变为 -200 MW, 仿真结果如图 11 所示。

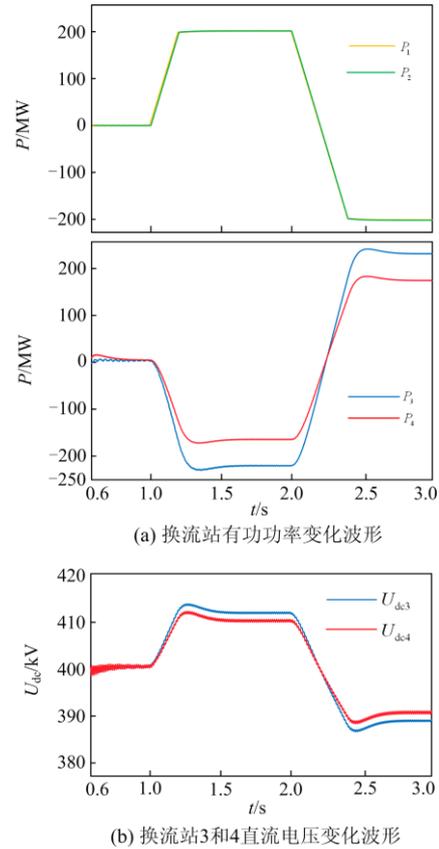


图 11 潮流反转仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms in case of power reversal

由图 11(a)可以看出, 换流站 1 和换流站 2 的功率由在 1 s 时变化为 200 MW, 2 s 时变化为 -200 MW。由于换流站功率的初始值为 0 MW, 所以无论在电压升高或者电压降低的情况下, 换流站 3 的功率裕度始终大于换流站 4 的功率裕度, 换流站 3 所承担的不平衡功率较多。换流站 3 的功率在 1 s 时变为 -228 MW, 2 s 时变为 228 MW, 换流站 4 的功率在 1 s 时功率变化为 -171 MW, 2 s 时功率变化为 171 MW。由图 11(b)可知换流站 3 的直流电压 1 s 时为 411 kV, 2 s 时变为 388 kV, 换流站 4 的直流电压在 1 s 时为 410 kV, 2 s 时为 390 kV, 在潮流反转时, 电压波动值均保持在直流电压参考值的 2.5%, 更有利于直流系统的稳定运行。

5 结论

本文针对多端柔性直流输电中线路电阻导致

功率分配不准确的问题, 以一个任意端柔性直流输电系统为例进行分析, 推导出了一种基于 U-P 下垂控制的下垂系数整定方法, 使得各个换流站的功率能够准确分配。同时在此基础上又考虑到换流站的容量, 利用换流站的裕度比来替代之前的固定分配比例, 使换流站能够充分利用自身的容量, 避免了换流站的过载。最后, 通过仿真分析表明, 通过该控制策略, 换流站在功率波动和潮流反转时都能够准确又合理地分配功率, 实现系统的功率平衡和直流电压稳定。

参考文献

- [1] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [2] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [3] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.
- [4] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [5] 程艳, 张健, 管冀, 等. HVDC 换相失败时受端电网的电压与频率联合控制策略[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 241-245.
CHENG Yan, ZHANG Jian, GUAN Ti, et al. Coordinated control strategy of voltage and frequency support at receiving end of HVDC system under commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 241-245.
- [6] 鲁江, 董云龙, 张庆武, 等. 基于直流调制度的特高压柔直阀组在线投入策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 154-161.
LU Jiang, DONG Yunlong, ZHANG Qingwu, et al. Valve group online entry strategy for VSC-UHVDC system based on DC modulation degree[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 154-161.
- [7] 张璐, 唐巍, 卢莹, 等. 面向新型源荷接入的交直流混合配电网关键技术研究综述[J]. 供用电, 2020, 37(10): 1-9, 21.
ZHANG Lu, TANG Wei, LU Ying, et al. Overview of hybrid AC/DC distribution network key technologies facing novel source and load integration[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(10): 1-9, 21.
- [8] 陆晶晶, 贺之渊, 赵成勇, 等. 直流输电网规划关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 182-191.
LU Jingjing, HE Zhiyuan, ZHAO Chengyong, et al. Key technologies and prospects for DC power grid planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 18-24.
- [9] LI B, HE J, LI Y, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249.
- [10] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Ziang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.
- [11] 黄沐鹏, 张鑫, 王奔. 含海上风电场的多端柔性直流互联系统频率稳定协调控制策略[J]. 广东电力, 2021, 34(5): 64-72.
HUANG Mupeng, ZHANG Xin, WANG Ben. Frequency stability coordination control strategy for VSC-MTDC interconnected power system with offshore wind farms[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(5): 64-72.
- [12] 韩伟, 杨睿璋, 刘超, 等. 混合三端直流输电系统线路故障特性及故障电流抑制策略[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 179-188.
HAN Wei, YANG Ruizhang, LIU Chao, et al. DC Fault Characteristics and fault current suppression strategy of three-terminal hybrid HVDC system based on LCC and hybrid MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 179-188.
- [13] 刘盼盼, 荆龙, 刘京斗, 等. MMC-HVDC 输电系统新直流电压斜率控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(6): 1-7.

- LIU Panpan, JING Long, LIU Jingdou, et al. A novel DC voltage slope control strategy for MMC-MTDC transmission system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(6): 1-7.
- [14] WANG Y, WEN W, WANG C, et al. Adaptive voltage droop method of multiterminal VSC-HVDC systems for DC voltage deviation and power sharing[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 34(1): 169-176.
- [15] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(3): 397-404.
- YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(3): 397-404.
- [16] 陈继开, 董飞飞, 王振浩, 等. 适用于功率波动的多端柔性直流系统改进下垂控制方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(11): 3708-3717.
- CHEN Jikai, DONG Feifei, WANG Zhenhao, et al. Research on improved droop control method of multi-terminal MMC-HVDC system suitable for power fluctuation[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(11): 3708-3717.
- [17] 徐经民, 徐在德, 童超. 基于模糊下垂控制的 VSC-HVDC 交直流系统潮流计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(20): 50-57.
- XU Jingmin, XU Zaide, TONG Chao. Power flow algorithm for VSC-HVDC AC/DC system based on fuzzy droop control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(20): 50-57.
- [18] 李盈含, 高亮. 基于下垂特性的柔性直流配电系统控制策略[J]. *现代电力*, 2020, 37(4): 391-399.
- LI Yinghan, GAO Liang. Control strategy of flexible DC distribution system based on droop characteristics[J]. *Modern Electric Power*, 2020, 37(4): 391-399.
- [19] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的 VSC-MTDC 功率协调控制[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1): 40-48.
- LIU Yuchao, WU Jian, LIU Huaiyuan, et al. Effective power sharing based on adaptive droop control method in VSC multi-terminal DC grids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 40-48.
- [20] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. VSC-MTDC 系统直流电压自适应斜率控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(4): 63-68.
- ZHU Ruike, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. An adaptive DC voltage droop control strategy for the VSC-MTDC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(4): 63-68.
- [21] 朱瑞可, 李兴源, 吴峰. 考虑功率裕度的 VSC-MTDC 系统改进下垂控制策略[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(3): 137-143.
- ZHU Ruike, LI Xingyuan, WU Feng. A novel droop control strategy taking into account the available headroom for VSC-MTDC system[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(3): 137-143.
- [22] 刘智杰. 模块化多电平换流器广义稳态分析模型及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- LIU Zhijie. Research on general steady-state analysis model and its application for modular multilevel converter[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [23] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [24] 李兴源, 曾琦, 王渝红, 等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. *高电压技术*, 2016, 42(10): 3025-3037.
- LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(10): 3025-3037.
- [25] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(10): 2588-2599.
- LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal HVDC systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(10): 2588-2599.
- [26] 周保坤, 邓旗, 张英敏, 等. 基于电力调度模式的 VSC-MTDC 系统 V-I 协调下垂控制策略[J]. *智慧电力*, 2019, 47(7): 43-50.
- ZHOU Baokun, DENG Qi, ZHANG Yingmin, et al. V-I coordinated droop control strategy for VSC-MTDC transmission systems based on power dispatching modes[J]. *Smart Power*, 2019, 47(7): 43-50.
- [27] 刘瑜超. 多端柔性直流输电系统功率控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- LIU Yuchao. Research on power control strategies of voltage source converter based multi-terminal DC transmission system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-11-07

作者简介:

王少林(1971—), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: wsl19710101@163.com

王刚(1986—), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向为高压直流输电. E-mail: wg19710102@163.com

(编辑 葛艳娜)