

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210250

# 基于增益系数优化的直流电网下垂控制策略

候文佚, 龚雁峰

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 中国电建江西省电力设计院有限公司, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 直流电压是衡量直流电网功率平衡的重要指标。系统功率的较大扰动使直流电压严重偏离额定值, 影响了直流电网的安全稳定运行。下垂控制可实现多点直流电压控制, 是直流电网协调控制的重要手段。为了应对直流电网单个换流站故障退出运行后造成的直流电压偏差超出其安全阈值, 提出了基于增益系数优化的新型直流电网下垂控制策略。该控制策略考虑了直流电网中换流站容量限制, 根据换流站整流和逆变的运行模式, 分别给出不同的下垂控制器增益系数, 对各个换流站进行优化功率分配, 以此达到减小直流电压偏差量的目标。通过与传统下垂控制方法比较, 突出了所提方法采用不同增益系数带来的优异性。并对两种方法进行 PSCAD 仿真验证, 仿真结果表明所提方法在直流电网面对较大功率缺失和溢出情况下的直流电压调节效果优于传统方法。

**关键词:** 直流电网; 下垂控制; 增益系数; 优化设计

## A droop control strategy for a DC grid based on gain coefficient optimization

HOU Wenyi, GONG Yanfeng

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Power China Jiangxi Electric Power Engineering CO., LTD., Nanchang 330096, China)

**Abstract:** DC voltage is an important indicator in measuring the power balance of a DC grid. A large disturbance in system power makes the DC voltage seriously deviate from the rated value. Droop control can realize multi-point DC voltage control, and this is the main means for coordinated control of the DC grid. In order to deal with the DC voltage deviation exceeding the safety threshold after the failure of a single converter station in a DC network, this paper optimizes the design of the gain parameters of the DC grid droop control. It considers the capacity limit of the converter station in the DC grid. Different droop controller coefficients are given based on the rectifying converting operation modes of the converter station. The power distribution of each converter station is optimized to achieve the goal of reducing the deviation of the DC voltage. The superiority of the proposed different gain coefficient methods over traditional methods is demonstrated. The two methods are simulated and verified using the PSCAD. Simulation results show that the proposed method can regulate the DC voltage in the case of large power loss and overflow in the DC grid. The effect is better than traditional methods.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/16-JS-198).

**Key words:** DC grid; droop control; gain coefficient; optimized design

## 0 引言

随着资源短缺和环境污染等问题日益严重, 开发风电太阳能等清洁可再生能源已成为电网的重要发展方向<sup>[1-3]</sup>。由于传统电网消纳能力不足导致“弃

风”、“弃光”等现象十分严重<sup>[4-5]</sup>, 目前大规模新能源并网仍面临较大挑战。基于柔性直流输电的直流电网由于具有控制灵活、响应速度快、谐波含量小等优势, 成为可再生能源消纳的重要手段<sup>[6-7]</sup>。

直流电压是衡量直流电网功率平衡的重要指标, 系统功率的较大扰动使直流电压严重偏离额定值, 影响直流电网的安全稳定运行<sup>[8]</sup>。随着直流电网的拓扑结构日益复杂多样, 协调控制直流电网的

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(SGTYHT/16-JS-198)

直流电压使各个换流站保持稳定运行变得至关重要<sup>[9]</sup>。直流电网的协调控制方法主要有主从控制、裕度控制和下垂控制三种控制方法<sup>[10-13]</sup>。主从控制方法和裕度控制方法通过调节主控换流站的输送容量来控制直流电压, 可见其对主控换流站的容量需求较大, 大大增加了换流站的建设成本, 并且随着直流电网中换流站数量的增加, 主控换流站的容量负担急剧增加。裕度控制方法不需要主控站较大的容量裕度且对通信的要求较低, 但是换流站通过设定特性曲线运行, 不利于实现直流电网的优化运行<sup>[14-17]</sup>。

下垂控制可实现直流电网多点直流电压控制, 利用给定的换流站功率与直流电压间的斜率关系实现多个换流站共同承担直流电压的控制<sup>[18-19]</sup>。文献[20]通过计算各个换流站的有功功率和直流电压参考值, 来控制直流电网的安全稳定运行。这种方法对通信速度提出了较高要求, 同时系统响应速度较慢、电压裕度选择较为困难。文献[21]主要分析了某个换流站中断功率传输后, 剩余换流站功率分配与直流电压偏差量的关系。文献[22]提出了新的下垂控制器设计方法, 能够保证直流电网传输最大有功功率的同时使每个换流站的直流电压偏差量都不会超过其限值。文献[23]通过引入公共直流参考电压, 以使各换流站能够更好地跟踪其功率指令值。

为了应对直流电网单个换流站故障退出运行后造成的直流电压偏差超出其安全阈值, 提出了基于增益系数优化的新型直流电网下垂控制策略。其考虑直流电网中换流站容量限制, 根据换流站整流和逆变的运行模式, 分别给定不同的下垂控制器增益系数, 对各个换流站优化功率分配, 以此达到减小直流电压偏差量的目标。文章通过与传统方法比较突出了所提不同增益系数方法的优越性, 并对两种方法进行 PSCAD 仿真验证。

## 1 直流电网直流电压下垂控制

直流电网直流电压平衡控制策略可以统称为一次电压控制, 其中直流电网下垂控制作为直流电网主要的协调控制策略, 可以实现直流电网的多点直流电压控制。直流电网中的下垂控制策略与交流电网中的一次调频控制策略类似, 其以直流电压作为电网功率平衡指示器, 当直流电压功率不守恒时, 可以检测到直流电压偏差, 根据直流电网偏差来调节各端换流站的有功功率指令。直流电压下垂控制器将换流站功率设定值根据换流站测量得到的直流电压偏差呈比例改变, 下垂控制器增益系数可以定义为

$$g = -\frac{\Delta p}{\Delta v_{dc}} \quad (1)$$

式中:  $\Delta v_{dc}$  为直流电压指令值与直流电压实际值的偏差;  $\Delta p$  为换流站功率指令值的变化。

同时定义  $\Delta V_{Lim}$  为允许的直流电压偏差最大值, 以确保交直流电网的稳定安全运行。设定换流站可变化的最大容量储备为  $\Delta P$ , 其表示为了应对直流电压偏差, 换流站可以承受的最大功率变化, 由此下垂控制器的增益系数又可表示为

$$g = -\frac{\Delta P}{\Delta V_{Lim}} \quad (2)$$

与交流电网中的电网调频特性相似, 整个直流电网电压增益特性  $\lambda_v$  可定义为直流电网功率扰动  $\Delta P_{dis}$  与稳定后直流电压偏差  $\Delta V_{dc}$  的比值。由于直流电网负载功率不会随直流电压变化, 因此直流电网电压增益特性  $\lambda_v$  可以分配给换流站下垂控制器的增益系数, 如式(3)所示。

$$\frac{\Delta P_{dis}}{\Delta V_{dc}} \approx \lambda_v = g_1 + g_2 + \dots + g_N = \sum_{m=1}^N g_m \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)便可确定各换流站下垂控制器的增益系数具体分配, 当换流站最大容量储备较大时, 其对应增益系数也会变大。

设定一个包含少量换流站的直流电网系统, 每个站对全局系统特性的影响很大。当其中一个换流站下垂控制器失效后, 它将不再对直流电压控制有贡献, 同时实际的直流电网电压增益特性将变小。假设在第  $k$  个站点丢失的情况下, 实际的直流电网电压特性可以表示为

$$\lambda_v^{(k)} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N g_m \quad (4)$$

由于直流电网电压特性的值变小, 对于给定的功率干扰, 直流电压偏差会变得更大。此外, 由于减少了可有助于直流电压控制的换流站数量, 需要施加在其余换流站上的功率变化值将变得更大。

由于换流站额定功率运行往往是最经济的运行方式, 通常期望换流站运行在额定功率附近。在这种情况下, 换流站的最大功率传输容量与额定运行功率接近, 其对直流电压下垂控制的可调功率容量较少, 否则会导致换流站传输功率过载, 影响器件的安全可靠性。

由于换流站本身不产生任何功率, 其传输功率变化将造成连接的交流电网上的功率扰动。为了不影交流电网的稳定性, 必须对换流站传输容量进行限制。

综上所述, 直流电网通过改变换流站传输功率来维持直流电网电压特性, 但换流站可变功率容量又受换流器器件本身容量裕度、连接交流电网容量等因素影响, 因此需要进一步探究在多种因素约束下直流电网直流电压下垂控制的最优经济运行。

## 2 下垂控制增益系数优化

为了便于阐述, 以图 1 所示的四端直流电网进行具体分析, 以此评估在不同的设定扰动运行条件下发生的最大直流电压偏差。图 1 是基于世界上首例真双极高压大容量柔性直流输电工程——厦门±320 kV/1 000 MW 柔性直流输电示范工程作为参考, 并在此基础上将其改造为四端直流电网模型。每个 MMC 换流站的额定容量、电压等级、接线形式与控制方式都参照厦门工程中的 MMC 换流站<sup>[24]</sup>。设换流站的运行容量大小相同, 运行范围为-1 000~1 000 MW。换流站 1、2 和 3 参与直流电压下垂控制, 换流站 4 交流侧连接着一个风电场, 其传输恒定功率为 1 000 MW, 不参与电压调节。

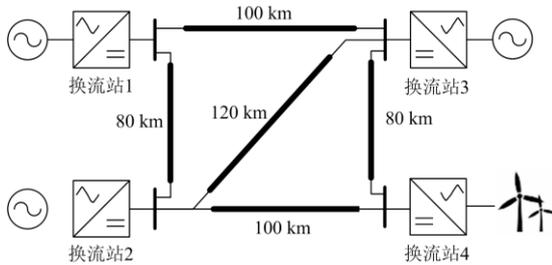


图 1 四端直流电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of four-terminal DC grid

直流电网中换流站控制策略可以分为站内功率控制以及站间协调控制, 其中原有换流站内的电流内外环控制属于站内功率控制, 其要求换流站在维持稳定运行基础上根据下发指令值快速响应; 下垂控制属于站间协调控制, 其主要是通过调节各换流站站站内控制的指令值以维持整个直流电网功率守恒和直流电压稳定, 其将采集电气量通过特定关系曲线运算得到站内控制指令值, 可见站间协调控制输出的指令值作为站内协调控制的输入。

忽略直流电网中换流站和线路的损耗, 则换流站 1、2 和 3 的总功率可表示为

$$P_1 + P_2 + P_3 = -1\,000 \text{ MW} \quad (5)$$

设定每个换流站的最大功率容量为 1 000 MW, 在正常运行时设定每个换流站的额定功率为 333 MW。设直流电压偏差限值为±10%, 当电压偏差在稳定状态下达到这个极限时, 每个换流站将充

分发挥容量裕度, 因此可根据式(2)计算出下垂增益系数为 5.208 3 MW/kV。

图 2 为三个换流站输出不同功率情况下直流电压的最大偏差。从图中可以, 看出直流电压偏差并未在规定±10%的约束范围内, 当运行点接近图中三角形的顶点时, 所有换流站的运行状态都接近它们的最大功率传输能力, 其并无足够功率容量来进行直流电压下垂控制, 最大电压偏差远远超过 10%。在顶点处的偏差达到 30%, 这将严重威胁整个直流电网系统的安全运行。

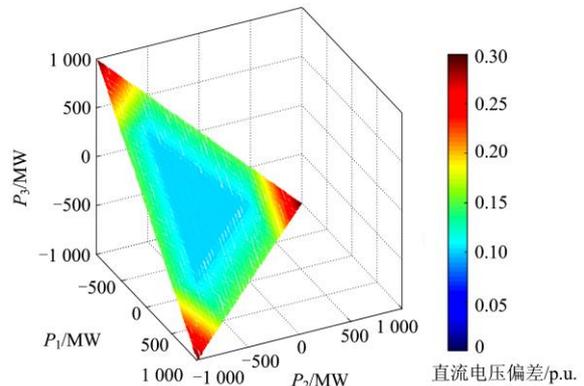


图 2 直流电压偏差与各站功率变化

Fig. 2 DC voltage deviation and power change of each station

由此可见上述方法不能确保所有运行点的直流电压安全, 因此文章对下垂控制增益系数设计方法进行改进, 可使换流站灵活分配功率负载。

图 3 为换流站整流逆变两种模式下, 下垂控制器设定的电压功率特性, 定义  $P^{\text{Nom}}$  为换流站最大功率容量,  $P_R^{\text{Set}}$  和  $P_I^{\text{Set}}$  为正常运行时整流和逆变模式下的功率设定值;  $V_{\text{dc}}^{\text{Nom}}$  为直流电压正常运行值,  $V_{\text{Lim}}^{\text{U}}$  和  $V_{\text{Lim}}^{\text{O}}$  为直流电压偏差的上下限值;  $UVCR_R$  和  $OVCR_R$  对应整流模式下功率增加值和减小值,  $UVCR_I$  和  $OVCR_I$  对应逆变模式下功率增加值和减小值。

假设在正常运行时直流电压处于标准值  $V_{\text{dc}}^{\text{Nom}}$ , 当整流站突然丢失功率时, 由于直流电网功率输入不足导致直流电压降低, 即欠电压状态。为了降低直流电压偏差, 整流站增加功率输入, 其工作点向上移动, 但其受换流站最大传输容量限制, 直流电压调节能力较弱。另一方面, 逆变模式下的换流站也可以通过降低输出功率来缓解直流电压下降, 其运行点也向上方移动。与整流站相比, 逆变站可用功率容量更大, 具有足够的上移空间。可见可用功率传输容量与换流站当前的运行条件和扰动功率输入输出方向有关。因此可知在直流电压下降时, 需

要取一个正值的功率变化  $UVCR$ ；在直流电压上升时，需要取一个负值的功率变化  $OVCR$ 。

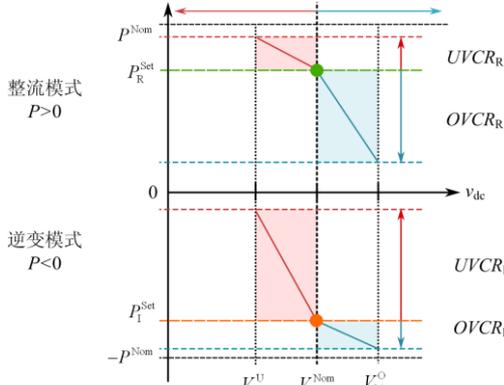


图3 整流逆变模式下电压功率特性

Fig. 3 Voltage power characteristics in rectifier inverter mode

由于传统下垂控制增益系数为定值，文章根据其处于欠压和过压模式下分别设定增益系数，如式(6)所示，其中  $g^O$  和  $g^U$  分别表示过电压和欠电压下垂增益系数。

$$\Delta p = \begin{cases} -g^O \Delta v_{dc} & \Delta v_{dc} > 0 \\ -g^U \Delta v_{dc} & \Delta v_{dc} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

为了在直流电压超过规定限值之前充分使用换流站的剩余容量，必须选择适当的下垂增益系数。根据直流电压偏差上下限值  $V_{Lim}^U$  和  $V_{Lim}^O$ ，可知新的下垂控制器增益系数如式(7)所示。

$$g_m^O = -\frac{OVCR_m}{V_{Lim}^O - V_{dc}^{Nom}}, g_m^U = -\frac{UVCR_m}{V_{Lim}^U - V_{dc}^{Nom}} \quad (7)$$

式中， $m$  可表示为整流模式或者逆变模式，由于  $OVCR_m \leq 0$ ， $UVCR_m \geq 0$ ，因此可知下垂增益系数都为正，可根据式(7)得到下垂增益系数是由电压偏差限值和换流站可用容量唯一确定。

为了保证在某个换流站突然中断运行产生的功率过剩或短缺可由其余换流站进行补偿，剩余换流站的安全可用容量之和必须大于中断换流站容量，否则系统将无法运行。因此根据以上条件可知换流站功率变化值  $OVCR$  和  $UVCR$  需满足以下条件：

$$\sum_{m=1, m \neq k}^N OVCR_m \leq P_k^{Set} \forall k, \text{ s.t. } P_k^{Set} \leq 0 \quad (8)$$

$$\sum_{m=1, m \neq k}^N UVCR_m \geq P_k^{Set} \forall k, \text{ s.t. } P_k^{Set} \geq 0 \quad (9)$$

式(8)考虑了每个逆变站中断功率传输，而式(9)考虑了每个整流站中断功率传输，以此作为直流电网直流电压下垂控制的必要条件。

图4给出了所提控制器的下垂系数的优化设计流程。当检测到直流电压与设定值出现偏差  $\Delta v_{dc}$  时，对换流站的直流电压偏差大小以及本身运行模式进行判定，得到适用于该类型下的特定下垂系数，并以此计算功率变化值 ( $\Delta p_m$ )，并将其添加到原来的预定功率值 ( $P_m^{Set}$ ) 中，以形成新的功率基准值。

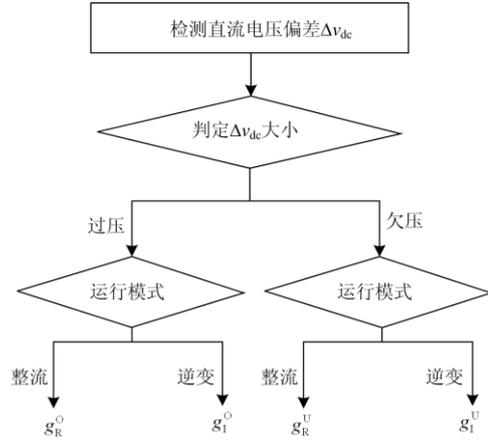


图4 下垂系数优化设计流程

Fig. 4 Optimization design process of droop coefficient

图5给出了采用所提下垂控制增益系数下直流电压偏差与各站功率变化的关系，与传统方法(图2所示)情况不同，直流电压偏差在任何运行点都保持在规定的  $\pm 10\%$  范围内。可见所提控制器可以很好地应对换流站功率变化，大大提高了直流电网的安全可靠性。

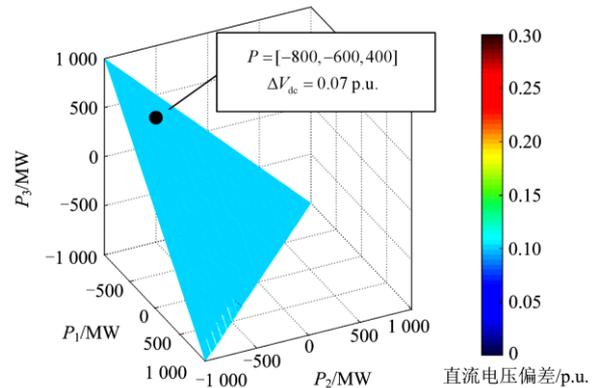


图5 直流电压偏差与各站功率变化

Fig. 5 DC voltage deviation and power change of each station

### 3 仿真实验

利用图1所示的四端直流电网模型进行PSCAD仿真实验。表1给出了该模型4个换流站正常运行时的负载以及传统方法下垂控制器增益系数设定值。下垂控制器增益系数  $g$  的选取还需要考虑

其余原有控制器的稳定性与稳定裕度,附录 A 推导了系统传递函数,并根据劳斯判据确定了增益系数  $g$  的最大最小值范围,以此保证整个系统的稳定性。

表 1 传统方法控制参数

| 变量          | 换流站 1 | 换流站 2 | 换流站 3 | 换流站 4 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 功率/MW       | -900  | -700  | 850   | 750   |
| $OVCR/MW$   | -333  | -333  | -333  | 0     |
| $UVCR/MW$   | 333   | 333   | 333   | 0     |
| $g/(MW/kV)$ | 5.21  | 5.21  | 5.21  | 0     |

从表 1 中可以看出,此时直流电网运行在较大负载模式下,其输送功率接近换流站最大容量 1 000 MW,其直流电压调节可用容量有限。控制器下垂增益系数不区分整流逆变运行模式,且各个换流站的增益系数相同,都为 5.21 MW/kV。

为了检验直流电网遇到较大功率输入或者缺失情形下垂控制的直流电压调节能力,设定换流站 1 退出运行和换流站 3 退出运行两种工况下直流电网直流电压和各换流站的功率变化情况。图 6 为两种工况下直流电压变化情况,图 7 为两种工况下各换流站功率变化情况, $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  分别对应 4 个换流站的输送功率。

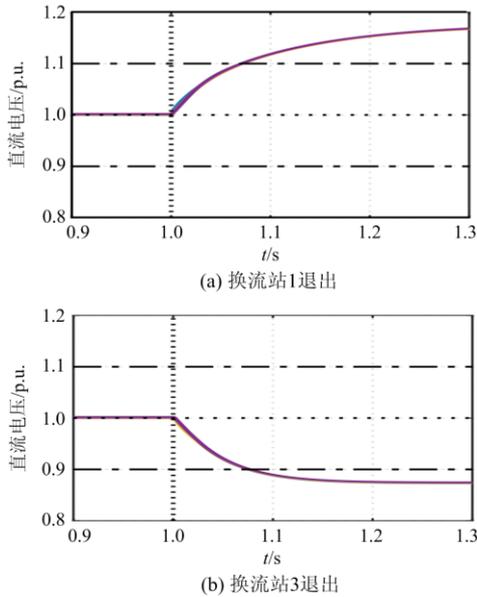


图 6 传统方法电压变化

Fig. 6 Voltage change of traditional method

从图 6(a)中可以看出,换流站 1 在 1 s 时退出运行,直流电网输入功率过剩,此时导致直流电网电压升高;从图 7(a)可以看出,换流站 1 的输送功率在 1 s 后立即变为 0,由于直流电网下垂控制器的作用,换流站 2 和 3 输送功率开始降低以调节直流电

压,但换流站 2 的输送功率很快达到容量限值 -1000 MW,没有充足可用容量来进一步调节电压,导致直流电压上升幅度超过 10%,对系统安全性造成危害。同理,从图 6(b)和图 7(b)中可以看出,在换流站 3 退出运行后,换流站 1 和 2 输送功率增加,其直流电压偏差量虽然比换流站 1 退出工况改善,但其下降幅度仍然大于 10%。

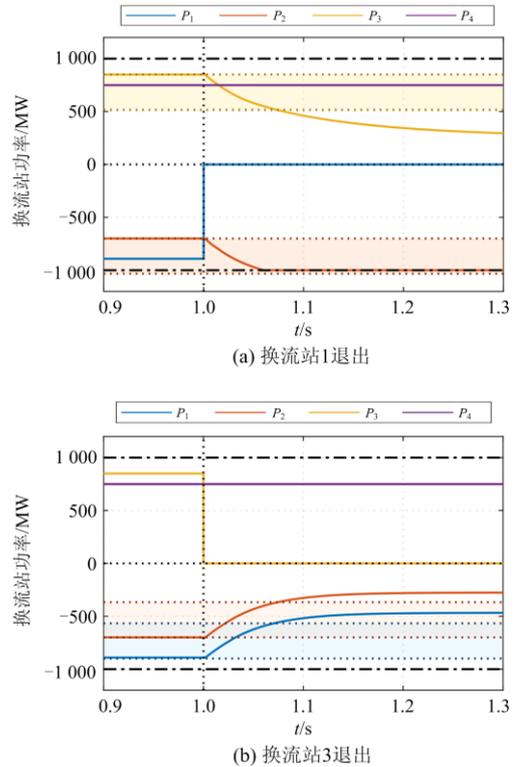


图 7 传统方法功率变化

Fig. 7 Power change of traditional method

综上分析可见传统方法在直流电网运行在较大负载工况下的直流电压调节能力较弱,无法应对某个换流站突然退出运行等较大干扰的情形。现采用优化设计后的下垂控制器增益系数进行仿真验证,表 2 为所提方法的具体控制参数,控制器下垂增益系数分整流、逆变运行模式,且各个换流站的增益系数都不相同。

表 2 所提方法控制参数

| 变量            | 换流站 1 | 换流站 2 | 换流站 3 | 换流站 4 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 功率/MW         | -900  | -700  | 850   | 750   |
| $OVCR/MW$     | -100  | -300  | -600  | 0     |
| $UVCR/MW$     | 425   | 425   | 150   | 0     |
| $g^O/(MW/kV)$ | 1.56  | 4.69  | 9.38  | 0     |
| $g^U/(MW/kV)$ | 6.64  | 6.64  | 2.34  | 0     |

两个直流电网模型初始运行状态相同, 同上述验证方案, 仍采取换流站 1 退出运行和换流站 3 退出运行两种工况进行比较。图 8 为两种工况下直流电压变化情况, 图 9 为两种工况下各换流站功率变化情况,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  分别对应 4 个换流站的输送功率。

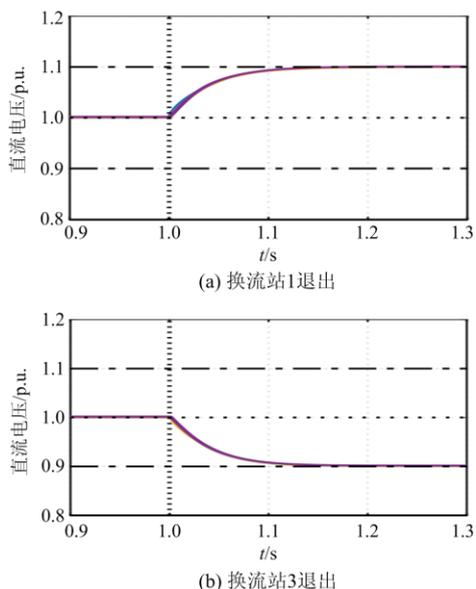


图 8 所提方法电压变化

Fig. 8 Voltage change of the proposed method

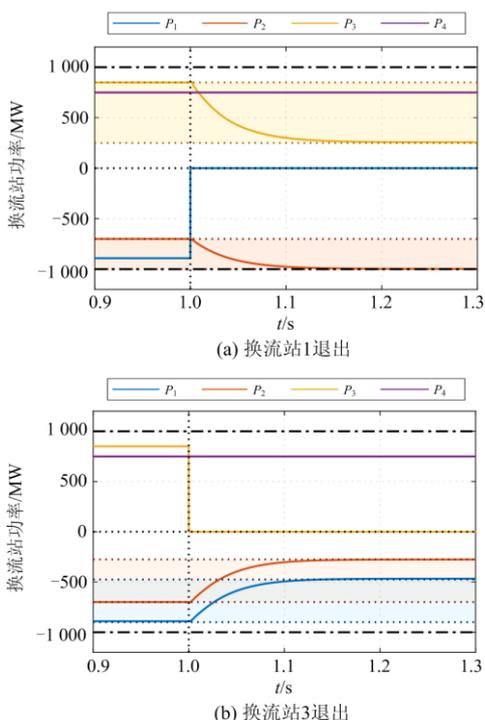


图 9 所提方法功率变化

Fig. 9 Power variation of the proposed method

从图 8 可以看出, 采用所提优化增益系数后直流电压偏差率被很好地限制在 10% 以内。从图 9(a) 中看出: 虽然换流站 2 的输送功率已经达到换流站限制容量, 但是由于整流模式下换流站 3 的增益系数更大, 使其输送功率能够更快下降以降低电网输入功率过剩的影响, 减小直流电压偏差量。与传统方法对比可见所提方法可以充分利用换流站剩余可用容量, 使其具备更强的电压调节能力, 能够承受更大的系统干扰。

针对更多端数的直流电网, 选取 PSCAD 官网的 CIGRE B4-57 模型, 其直流电网结构如图 10 所示。如图中红色圆圈标记, 主要在换流站 1、换流站 2 和换流站 3 中加入所提参数优化的下垂控制器, 换流站 4 设定为固定功率。

表 3 为所提方法的具体控制参数, 控制器下垂增益系数分整流、逆变运行模式, 且各个换流站的增益系数都不相同。

表 3 所提方法控制参数

| Table 3 Control parameters of the proposed method |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|
| 变量  | 换流站 1 | 换流站 2 | 换流站 3 | 换流站 4 |
| 功率/MW   | -500  | -500  | 500   | 500   |
| OVCR/MW   | -500  | -500  | -600  | 0     |
| UVCR/MW   | 900   | 900   | 400   | 0     |
| $g^O$ /(MW/kV)                                    | 3.12  | 3.12  | 3.85  | 0     |
| $g^U$ /(MW/kV)                                    | 6.64  | 6.64  | 2.34  | 0     |

与上文中方式相同, 采取换流站 1 退出运行的工况, 图 11 为该工况下直流电压变化情况, 图 12 为各换流站功率变化情况,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  分别对应 4 个换流站的输送功率。

从图 11 可以看出, 在多端直流电网中采用所提优化增益系数后直流电压偏差率被很好地限制在 8% 左右。从图 12 可以看出, 在换流站 1 退出运行后, 其功率缺额由换流站 2 和 3 承担, 且这两个换流站都没有超出本身容量。综上所述, 所提方法在多端直流电网中仍适用。

## 4 结论

文章提出了一种新的直流电网下垂控制器增益系数优化设计方法, 其能够在换流站给定容量不超出本身器件限制的情况下, 最大程度地降低直流电网直流电压偏差量, 保证直流电网安全稳定运行。

所提方法与传统方法进行比较后可以看到其在相同工况相同扰动下电压偏差量更小, 且在直流电网运行负载较高的工况下, 所提方法的效果更为显著。



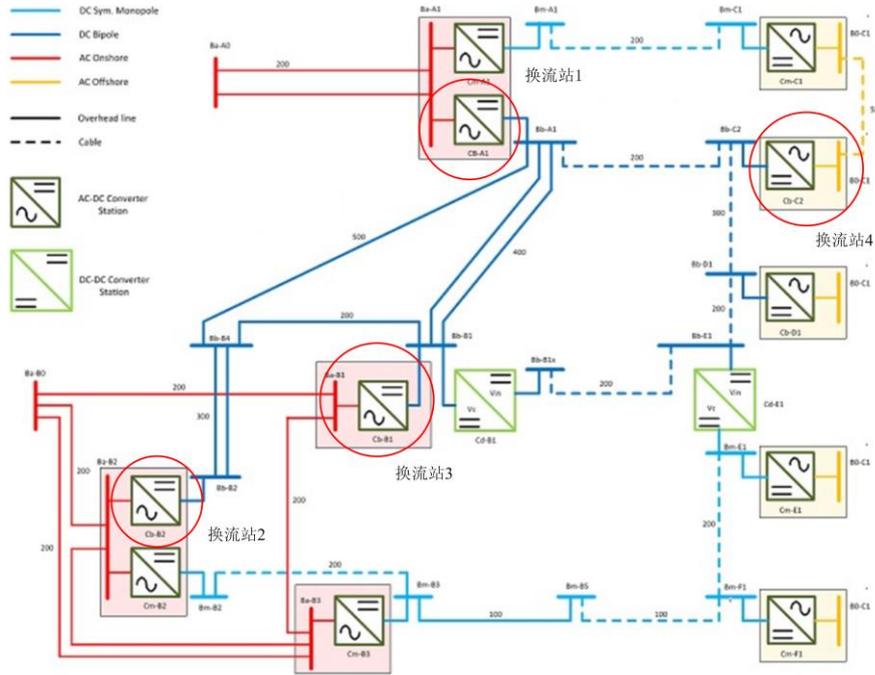


图 10 CIGRE B4-57 直流电网模型结构  
Fig. 10 CIGRE B4-57 DC grid model structure

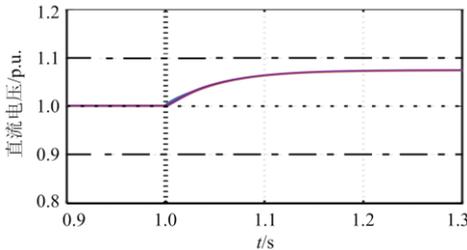


图 11 换流站 1 退出后直流电压变化

Fig. 11 DC voltage changes after the exit of converter station 1

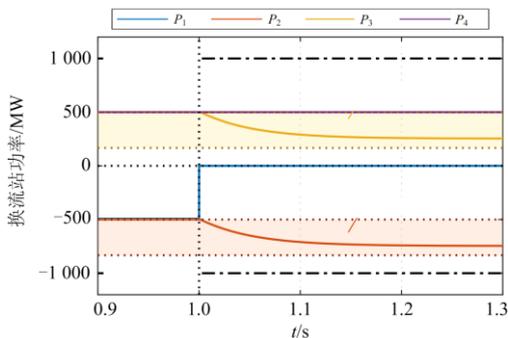


图 12 换流站 1 退出后功率变化

Fig. 12 Power variation after exit of converter station 1

所提方法可以应用到海上风电直流并网工程中，其能够保证在电网扰动下风电功率持续输送，降低风机脱网风险。

附录 A

图 A1 为下垂控制作用下 MMC 直流电压控制系统模型，其包括下垂控制器结构和直流电压动态特性模型。其中  $g$  为下垂控制器增益系数， $L_0$ 、 $C_0$  为桥臂电抗和子模块电容， $N$  为子模块个数， $u_c$  为子模块电容电压。 $u_{dc}$ 、 $u_{dcref}$  分别为直流电压的测量值和参考值； $P$ 、 $P_{ref}$  分别为有功功率的测量值和参考值。同时模型引入了三个一阶延时环节，用以等效测量及计算  $dq$  轴电流的时间。各延时环节分别为 MMC 直流侧电压测量等效环节  $T_{mdc}$ 、功率测量等效环节  $T_{mp}$  以及电网交流电流等效环节  $T_s$ ； $k_p$  为比例系数； $T_p$  为积分环节时间常数。

由图 A1 可得整个控制系统的开环传递函数和闭环传递函数可分别表示为式(A1)和式(A2)。

$$G(s) = \frac{Ng(k_p T_p s + 1)}{8s^2(T_{mdc}s + 1)(T_s s + 1)T_p C_0} \quad (A1)$$

$$H(s) = \frac{Ng(k_p T_p s + 1)}{8s^2(T_{mdc}s + 1)(T_s s + 1)T_p C_0 + Ng(k_p T_p s + 1)} \quad (A2)$$

由式(A2)可得系统的闭环特征方程为

$$8T_p T_{mdc} T_s C_0 s^4 + 8T_p (T_{mdc} + T_s) C_0 s^3 + 8T_p C_0 s^2 + Ngk_p T_p s + ND = 0 \quad (A3)$$

根据劳斯判据, 式(A3)的稳定判据如下所示。

$$8T_p T_{mdc} T_s C_0 > 0 \quad (A4)$$

$$8T_p (T_{mdc} + T_s) C_0 > 0 \quad (A5)$$

$$\frac{8T_p (T_{mdc} + T_s) C_0 - Ngk_p T_{mdc} T_s T_p}{T_{mdc} + T_s} > 0 \quad (A6)$$

$$Ngk_p T_p - \frac{8Ng(T_{mdc} + T_s)^2 T_p C_0}{8(T_{mdc} + T_s) T_p C_0 - NDk_p T_{mdc} T_s T_p} > 0 \quad (A7)$$

$$Ng > 0 \quad (A8)$$

由式(A4)一式(A7)可得下垂系数的取值范围为

$$0 < g < \frac{8k_p (T_{mdc} + T_s) T_p C_0 - 8(T_{mdc} + T_s)^2 C_0}{Nk_p^2 T_{mdc} T_s p} \quad (A9)$$

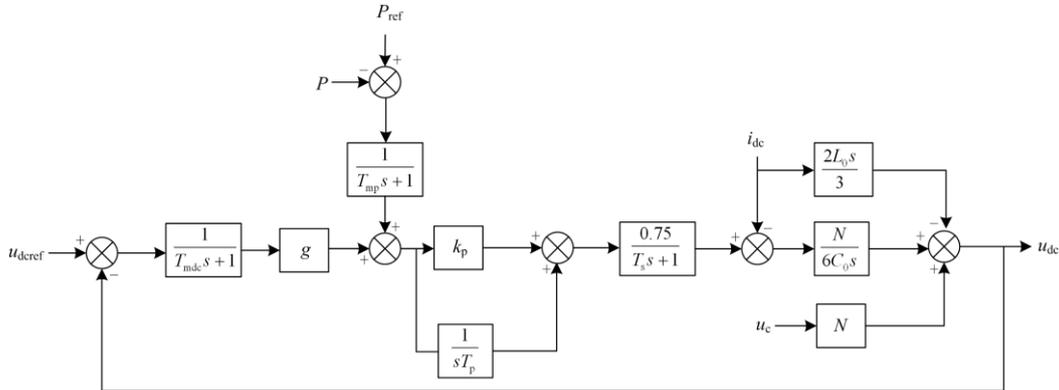


图 A1 下垂控制作用下 MMC 直流电压控制系统模型

Fig. A1 MMC DC voltage control system model under sagging control

### 参考文献

- [1] TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. R&D and application of voltage sourced converter based high voltage direct current engineering technology in China[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 1-15.
- [2] HE Jinghan, CHEN Ke'ao, LI Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 151-165. DOI: 10.1186/s41601-020-00157-9.
- [3] 陈若尘, 张英敏, 刘麒麟, 等. 基于粒子群算法的直流系统网架结构优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 165-172.  
CHEN Ruochen, ZHANG Yingmin, LIU Qilin, et al. Optimal design of grid structure in a DC system based on a PSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 165-172.
- [4] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173.  
DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei Demonstration Project of MMC-HVDC Grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173.
- [5] AN Q, WANG J X, LI G Y, et al. Role of optimal transmission switching in accommodating renewable energy in deep peak regulation-enabled power systems[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 577-584.
- [6] BELL K, CIRIO D, DENIS A M, et al. Economic and technical criteria for designing future off-shore HVDC grids[C] // 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, October 11-13, 2010, Gothenburg, Sweden.
- [7] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [8] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 8-15.  
WU Meng, HE Zhiyuan, YAN Fayou, et al. Analysis of the influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 8-15.
- [9] 洪莎莎, 武迪, 吕宏水, 等. 基于高阶系统模型的VSC-MTDC下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 125-131.  
HONG Shasha, WU Di, LÜ Hongshui, et al. Droop control strategy research of VSC-MTDC based on high-order system model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 125-131.

2017, 45(22): 125-131.

[10] 王渝红, 阳莉汶, 江伟, 等. 直流电网联网设备与控制策略研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 12-24.  
WANG Yuhong, YANG Liwen, JIANG Wei, et al. Review on equipment and control strategies of DC power grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 12-24.

[11] 王子豪, 牟龙华, 方重凯. 基于下垂控制的低压微电网故障控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 84-90.  
WANG Zihao, MU Longhua, FANG Chongkai. Fault control strategy of a low-voltage microgrid based on droop control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 84-90.

[12] 韩民晓, 熊凌飞, 丁辉. 利用电压倾斜控制的VSC-MTDC稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1808-1813.  
HAN Minxiao, XIONG Lingfei, DING Hui. Stability analysis of VSC-MTDC with voltage droop control[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1808-1813.

[13] 熊凌飞, 韩民晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1586-1592.  
XIONG Lingfei, HAN Minxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1586-1592.

[14] 黄智达, 石兆麒, 梅勇. 多端柔性直流输电系统动态协调优化控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 45-52.  
HUANG Zhida, SHI Zhaoqi, MEI Yong. Dynamic coordination optimization control strategy for MMC-MTDC systems[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 45-52.

[15] 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): 3-9, 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): 3-9, 21.

[16] 李国庆, 孙银锋, 吴学光. 柔性直流输电稳定性分析及控制参数整定[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 231-239.  
LI Guoqing, SUN Yinfeng, WU Xueguang. VSC-HVDC stability analysis and control parameter setting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 231-239.

[17] 韩民晓, 翟冬玲, 唐晓骏. 连接低惯量系统的柔性直流输电模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 198-206.  
HAN Minxiao, ZHAI Dongling, TANG Xiaojun. Model predictive control of voltage source converter-HVDC connected to low inertia system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 198-206.

[18] 冯长有, 姚伟锋, 江叶峰, 等. 特高压直流运行风险评估技术研究及应用[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 30-37.  
FENG Changyou, YAO Weifeng, JIANG Yefeng, et al. Study and application of UHVDC operation risk evaluation[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 30-37.

[19] XIE L J, YAO L Z, CHENG F, et al. Coordinate control strategy for stability operation of offshore wind farm integrated with Diode-rectifier HVDC[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 205-216.

[20] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 连接弱交流电网的VSC-HVDC失稳机理及判据研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3884-3896.  
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, GAO Benfeng, et al. Instability mechanism and criterion analysis of VSC-HVDC connected to the weak AC power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3884-3896.

[21] BEERTEN J, BELMANS R. Analysis of power sharing and voltage deviations in droop-controlled DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 4588-4597.

[22] ABDEL-KHALIK A, MASSOUD A, ELSEROUGI A, et al. Optimum power transmission-based droop control design for multi-terminal HVDC of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3401-3409.

[23] 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.

[24] 阳岳希, 贺之渊, 周杨, 等. 厦门±320 kV柔性直流输电工程的控制方式和运行性能[J]. 智能电网, 2016, 4(3): 229-234.  
YANG Yuexi, HE Zhiyuan, ZHOU Yang, et al. Control mode and operation performance of Xiamen ±320 kV flexible HVDC transmission project[J]. Smart Grid, 2016, 4(3): 229-234.

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-05-08

作者简介:

侯文侠(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: 15079406295@139.com

龚雁峰(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、电力系统稳定分析、先进测控与计算机技术在电力系统中的应用等。

(编辑 周金梅)