

适用于功率突变的MTDC系统改进下垂控制

王伟,徐燕芬

(中车青岛四方车辆研究所有限公司,山东 青岛 266031)

摘要: 直流电压的稳定控制是多端柔性直流输电系统安全运行的关键,多端系统的安全运行需要满足 $N-1$ 法则。在功率发生突变时,功率不平衡将导致直流电压发生偏移,严重时造成换流站脱网,且传统下垂控制的换流站受限于固定的下垂系数,难以适应功率突变。针对此问题,提出改进下垂控制,通过监测换流站直流电压和有功功率的偏差值,引入影响因子并设置电压滞环,自适应修正下垂系数,以抑制功率突变情况下直流电压的偏移。基于Matlab/Simulink搭建基于电压源型换流器的四端柔性直流输电系统仿真模型,构造主/从站退出运行、潮流反转3种工况,验证改进下垂控制策略在功率突变情况下,能够满足 $N-1$ 法则,保障多端系统的安全运行。

关键词: 多端柔性直流输电系统;协调控制;下垂系数;改进下垂控制;影响因子

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21678

Improved Droop Control Strategy for MTDC System Suitable for Changed Active Power

WANG Wei, XU Yanfen

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266031, Shandong, China)

Abstract: Reasonable control strategy for DC voltage is the key factor to ensure the stable operation of multi-terminal direct current (MTDC) system. Moreover, MTDC system is required to satisfy the $N-1$ rule. When the active power changes suddenly, DC voltage will be offset due to the unbalanced active power. More seriously, the converter station may be disconnected from the grid. Traditional droop control strategy is limited by the fixed droop control coefficient which is difficult to adapt to complex working conditions. In order to solve this problem, the improved droop control strategy was proposed. By detecting the deviation value of DC voltage and active power, setting impact factor and voltage hysteresis, the droop coefficient would be automatically corrected. Based on Matlab/Simulink, a four-terminal VSC-MTDC transmission system simulation model was built. By constructing three working conditions: main/slave station exits and power flow reversal, it was proved that the improved droop control strategy can satisfy the $N-1$ rule and ensure the stable operation of power system, when the active power changes suddenly.

Key words: multi-terminal direct current (MTDC) system; coordinated control; droop control coefficient; improved droop control; impact factor

柔性直流输电技术以其控制灵活、运行可靠以及非同步并网等技术优势,逐渐成为我国电能传输和新能源并网的重要手段。相比于两端柔性直流输电系统,基于电压源型换流器的多端柔性直流输电(voltage source converter based multi-terminal direct current, VSC-MTDC)系统以其多送点供电、多落点受电的运行特性广受关注。为满足系统运行的可靠性,要求VSC-MTDC系统满足 $N-1$ 法则,即使任一换流站退出运行,剩余

系统仍能恢复功率平衡,并维持直流电压稳定。

VSC-MTDC系统需要考虑换流站之间的协调配合,以使系统直流侧电压能够运行在允许的范围之内,系统传输的有功功率能够维持在平衡状态。文献[1]介绍了VSC-MTDC系统的单点控制和多点控制,简明扼要地指出了多点控制可靠性高、控制复杂、不依赖于站间通信的特点;下垂控制为多点控制,结合定直流电压、定有功功率控制,实现多处换流站对直流电压的共同控制,

并依据下垂系数协调控制有功功率;文献[2-6]从实际工程出发,验证了传统下垂控制策略的运行特性,同时指出传统下垂控制因下垂系数固定,难以适应复杂工况,存在局限性;文献[7-8]对下垂控制曲线进行分析,指出在以电流流出直流网络为正方向的前提下,VSC-MTDC系统中所有VSC的 $U-I$ 特性曲线满足函数连续且单调递增的条件时,VSC-MTDC系统能够维持平衡;文献[9]提出一种适用于功率波动的自适应下垂控制策略,对换流站内环控制器进行优化,提高了下垂控制的响应速度,但该方法需要对控制参数的参考值进行修正,容易产生直流电压偏差;文献[10]通过引入电压影响因子对下垂系数进行修正,以达到抑制直流电压突变的效果,改善系统直流电压质量,但该方法容易引起下垂系数的频繁波动;文献[11-14]通过仿真试验,确定优化下垂系数的取值范围,并监测直流电压偏差,自动修正下垂系数,但该方法计算量较大,外环控制相对繁琐。

针对上述问题,提出一种改进下垂控制策略,首先监测直流电压和有功功率的偏差值,而后引入影响因子并设置电压滞环,自适应修正下垂系数,以适应于功率突变。该方案能够有效抑制下垂系数的频繁波动,且计算相对简单,能够有效提高功率恢复速度,维持直流电压稳定。此外,基于 Matlab/Simulink 搭建四端 VSC-MTDC 系统仿真模型,在主站、从站退出运行以及潮流反转等3种工况下,分别校验传统、改进下垂控制策略的运行效果,证明改进下垂控制适用于功率突变的情况,能够满足 $N-1$ 法则,保障VSC-MTDC系统安全运行。

1 传统下垂控制策略

传统下垂控制按照预先设定的下垂控制特性曲线调整换流站有功功率,如图1所示。

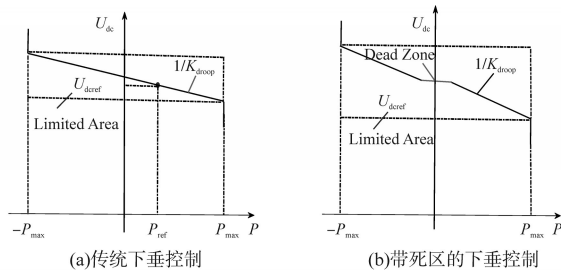


图1 下垂控制特性曲线

Fig.1 Characteristic curves of droop control

合理设计下垂系数 K_{droop} 是VSC-MTDC系统安全运行的重要前提。通常,VSC-MTDC系统的换流站基于 d,q 解耦的双闭环控制策略。对于具有下垂控制特性的换流站,以整流方向,即电流注入直流电网的方向为正方向,根据 $I_{\text{dc}}-U_{\text{dc}}$ 或 $P-U_{\text{dc}}$ 下垂特性曲线生成内环电流参考值 I_{dcref} 。

根据下垂特性,换流站直流电流 I_{dc} 与直流电压 U_{dc} 的关系式为

$$(I_{\text{dcref}} - I_{\text{dc}})/K_{\text{droop}} = U_{\text{dcref}} - U_{\text{dc}} \quad (1)$$

根据 $P=U_{\text{dc}} I_{\text{dc}}$ 可得 $P-U_{\text{dc}}$ 的关系式为

$$P = K_{\text{droop}} U_{\text{dc}}^2 + U_{\text{dc}} (I_{\text{dcref}} - K_{\text{droop}} U_{\text{dcref}}) \quad (2)$$

式(2)经配方可得:

$$P = K_{\text{droop}} (U_{\text{dc}} - a)^2 + b \quad (3)$$

其中

$$a = \frac{U_{\text{dcref}}}{2} - \frac{I_{\text{dcref}}}{2K_{\text{droop}}}$$

$$b = -\frac{I_{\text{dcref}}^2}{4K_{\text{droop}}} - \frac{K_{\text{droop}} U_{\text{dcref}}^2}{4} + \frac{I_{\text{dcref}} U_{\text{dcref}}}{2}$$

可见,下垂控制换流站的有功功率与电压呈二次函数关系。在以整流方向为正方向的前提下,取二次函数单调递减区域作为下垂控制特性曲线,并根据直流电压的允许范围 $[U_{\text{min}}, U_{\text{max}}]$,绘制下垂控制特性曲线的限定范围。根据式(1)~式(3),绘制下垂控制功率特性 $U-P$ 曲线,如图2所示。其中, A 点为换流站的额定运行状态点, B , C 两点为换流站运行的边界点,换流站必须运行在限定范围之内。

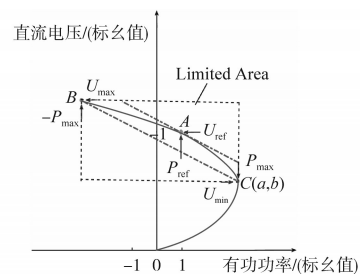


图2 电压—功率下垂控制特性曲线

Fig.2 $U-P$ droop control characteristic curve

根据式(1)~式(3),利用Matlab绘制如图3所示的功率、电压、下垂系数的控制特性。可见,在下垂控制策略中,直流电压质量与功率分配特性相互制约。下垂系数较大时,直流电压稳定性强,但系统功率分配能力变弱,下垂系数过大,会导致换流站间直流电压控制的冲突;若下垂系数较小,系统功率分配性能较好,但直流电压对有功功率的变化更加敏感,直流电压的控制特性并不明显。

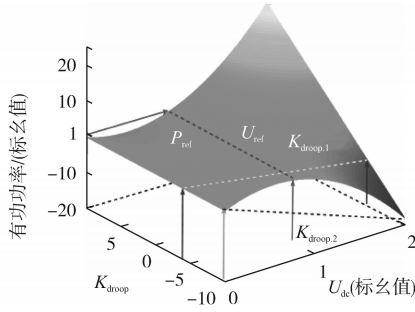


图3 功率、电压、下垂系数控制特性

Fig.3 Control characteristics of power, voltage, droop coefficient

2 改进下垂控制策略

传统下垂控制下垂系数固定,难以适应复杂工况。在换流站退出运行致使有功功率大幅度波动的情况下,将会导致换流站瘫痪。下垂系数在功率发生突变时若能够自我调整,以适应不同工况,将大大提高系统运行的可靠性。

传统下垂控制中,下垂系数 K_{droop} 的定义式为

$$K_{droop} = k_i = \frac{\Delta P_{imax}}{\Delta U_{dcmax}} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta U_{dcmax} &= U_{dcref} - U_{dcmin} \\ \Delta P_{imax} &= P_{iref} - P_{imax} \end{aligned}$$

式中: U_{dcref} , P_{iref} 分别为下垂控制端直流电压、换流站有功功率的参考值; U_{dcmin} , P_{imax} 分别为下垂控制端直流电压最小值和换流站有功功率的最大值。换流站输送的有功功率的偏差为

$$\Delta P_i = P_{iref} - P_i \quad (5)$$

换流站直流电压的偏差为

$$\Delta U_{dc} = U_{dcref} - U_{dc} \quad (6)$$

下垂系数切换前后, U_{dcmin} , U_{dcmax} 一般保持不变,因此通过引入影响因子 α_i 修正 P_{imax} 以自适应修正下垂系数。令 U_{th} 为直流电压变化的门槛值,当 $|\Delta U_{dc}| < U_{th}$ 时,系统直流电压偏移较小,此时系统应以协调有功功率平衡为主;当 $|\Delta U_{dc}| > U_{th}$ 时,系统直流电压偏移较大,此时系统应以维持直流电压稳定为主。根据 ΔU_{dc} , ΔP_i 的变化情况,可知修正后换流站有功功率最大值 P'_{imax} 为

$$\begin{cases} P'_{imax} = P_{imax} - \alpha_i \Delta P_i & |\Delta U_{dc}| < U_{th} \\ P'_{imax} = P_{imax} + \alpha_i \Delta P_i & |\Delta U_{dc}| > U_{th} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\alpha_i = -\frac{\Delta U_{dc}}{\Delta U_{dcmax}}$$

为抑制下垂系数在电压偏差较小时频繁切

换,设置电压滞环,在 ΔU_{dc} 上引入滞环控制,且环宽为 $2|U_m|$, U_m 为电压滞环门槛值。电压偏差在 $[-U_m, U_m]$ 之间,下垂系数保持初始值不变,则下垂系数 k_i 表示为

$$k_i = \begin{cases} \frac{P_{iref} - P_{imax} - \alpha_i \Delta P_i}{\Delta U_{dcmax}} & |\Delta U_{dc}| > U_{th} \\ \text{保持不变} & |\Delta U_{dc}| \leq U_m \\ \frac{P_{iref} - P_{imax} + \alpha_i \Delta P_i}{\Delta U_{dcmax}} & U_m < |\Delta U_{dc}| < U_{th} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(4)~式(8),改进下垂控制算法的控制框图如图4所示,首先监测直流电压偏差 ΔU_{dc} ,进行电压滞环判断,而后引入影响因子 α_i ,按式(8)修正下垂系数、下垂系数 k_i 和 ΔU_{dc} 的乘积与有功功率偏差 ΔP_i ,经PI环节,输出交流电流 d 轴分量参考值 I_{dref} 。

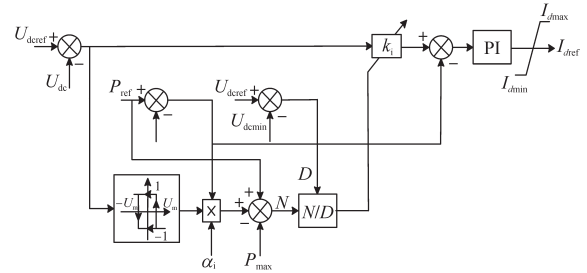


图4 改进下垂控制框图

Fig.4 Block diagram of improved droop control

以送端换流站 VSC_1 为例,根据式(4)~式(8)编写程序,下垂系数初始值为-10,利用Matlab绘制换流站 VSC_1 在采用传统下垂控制和改进下垂控制策略时直流电压与系统功率传输的约束关系。

如图5所示, $P_{GS3} + P_{GS4}$ 为逆变站 VSC_3 和 VSC_4 从直流电网中吸收的有功功率, P_{WF1} 为整流站 VSC_1 注入系统的有功功率。 $Surface_1$ 为传统下垂控制平面, $Surface_2$ 为改进下垂控制平面, $Surface_3$ 为额定电压 U_{ref} 平面。在多端系统有功功率发生波动时, $Surface_2$ 比 $Surface_1$ 更接近 $Surface_3$,且直流电压的偏差被限制在 $\pm 0.1 U_{dcref}$ 以内。可见,本节提出的改进下垂控制策略比传统下垂控制策略对直流电压的稳定能力更强。图6展示了改进下垂控制策略中下垂系数的变化情况,当 $|\Delta U_{dc}|$ 取值在电压滞环范围之内时,下垂系数保持初始状态;超出电压滞环范围,但在门槛值以内时,下垂系数减小,提高换流站的功率分配能力;超出门槛值时,下垂系数增大,以抑制直流电压的变化。

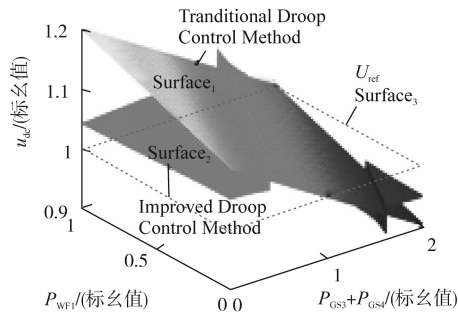


图5 直流电压与功率传输的约束关系

Fig.5 Constraint relationship between DC voltage and active power

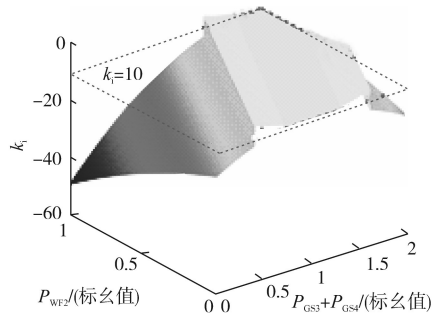


图6 下垂系数

Fig.6 Droop control coefficient

3 仿真分析

VSC-MTDC系统的耦合性较强,仅分析单端换流站的电压—功率特性并不充分。搭建如图7所示的四端VSC-MTDC系统的仿真模型,在主站、从站退出运行以及潮流反转等3种工况下,对2种控制策略的控制效果进行分析,仿真模型主要参数如表1所示。

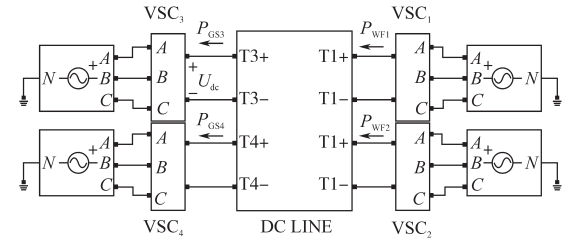


图7 四端柔性直流输电系统仿真模型

Fig.7 Simulation model for four-terminal flexible HVDC transmission system

表1 仿真模型参数

Tab.1 Simulation model parameters

换流站	类型	有功功率参考值/MW	直流电压参考值/kV
VSC ₁	下垂控制端	200	300
VSC ₂	从站	250	300
VSC ₃	主站	—	300
VSC ₄	下垂控制端	200	300

3.1 主站退出运行

假设主站VSC₃在1.0 s退出运行,当系统采用传统下垂控制时,系统直流电压及各换流站有功功率的变化情况如图8所示。

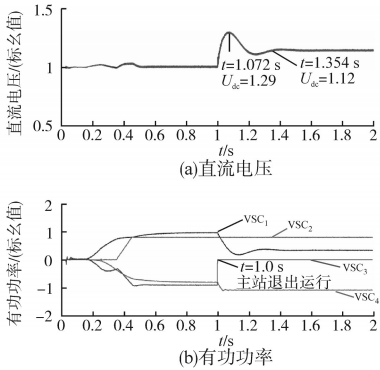


图8 传统下垂控制波形图

Fig.8 Waveforms with traditional droop control

采用改进下垂控制策略时,系统直流电压及各换流站有功功率的变化情况如图9所示。

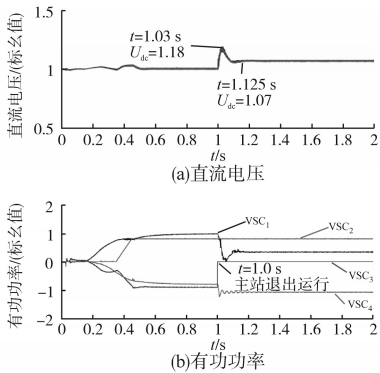


图9 改进下垂控制波形图

Fig.9 Waveforms with improved droop control

对比图8和图9中直流电压与有功功率的波形可知,在多端系统主站退出运行时,系统直流电压陡增,由于系统采用了下垂控制,下垂控制换流站重新分配有功功率以维持系统稳定运行。然而,在传统下垂控制策略下,直流电压越限较高,约为1.3(标么值),经0.35 s后,直流电压最终稳定在1.1(标么值);在改进下垂控制策略下,直流电压越限至1.2(标么值),经0.125 s后,直流电压稳定在1.07(标么值)。由此可见,相比于传统下垂控制策略,改进下垂控制策略维持系统稳定运行的能力更强。值得注意的是,在主站退出运行的极端情况下,系统直流电压瞬时越限仍然较高,约为1.2(标么值),此时系统仍需考虑配合其他手段来抑制过电压。

3.2 从站退出运行

假设从站 VSC_2 在 1.0 s 退出运行,当系统采用传统下垂控制时,系统直流电压及各换流站有功功率的变化情况如图 10 所示。

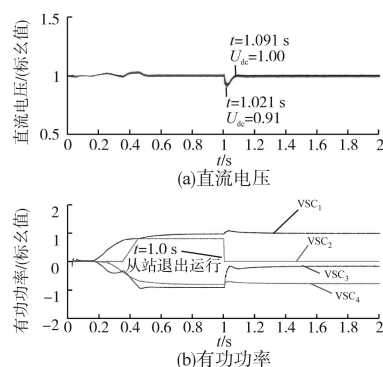


图 10 传统下垂控制波形图

Fig.10 Traditional droop control waveforms

采用改进下垂控制策略时,系统直流电压及各换流站有功功率的变化情况如图 11 所示。

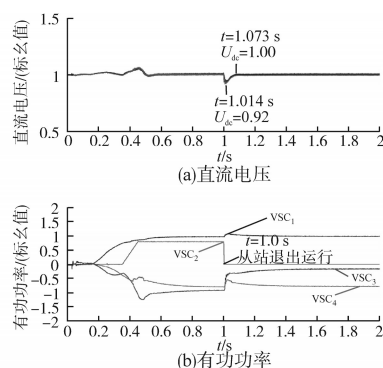


图 11 改进下垂控制波形图

Fig.11 Waveforms with improved droop control

对比图 10 和图 11 中直流电压与有功功率的波形可知,在多端系统从站退出运行时,系统直流电压发生跌落,但跌落幅度不大。由于换流站采用了下垂控制,下垂控制端重新分配功率以维持系统稳定运行。在这种情况下,两种控制策略对直流电压下降的幅度影响不大,传统下垂控制直流电压瞬时下降至 0.91(标么值),经 0.09 s 恢复至额定电压;改进下垂控制直流电压瞬时下降至 0.92(标么值),经 0.07 s 恢复至额定电压。由此可见,在从站退出运行时,2 种控制策略的效果相差不多,但改进下垂控制策略功率恢复速度相对较快。

3.3 潮流反转

假设换流站 VSC_2 在 1.0 s 发生潮流反转,当系统采用传统下垂控制时,系统直流电压及各换流站有功功率的变化情况如图 12 所示。

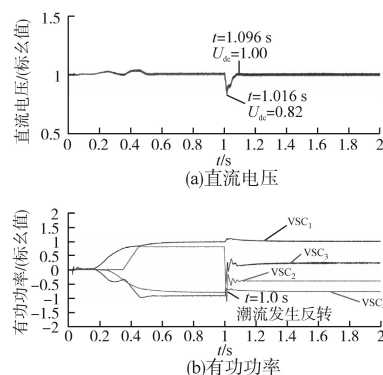


图 12 传统下垂控制波形图

Fig.12 Waveforms with traditional droop control

采用改进下垂控制策略时,系统直流电压及各换流站有功功率的变化情况如图 13 所示。

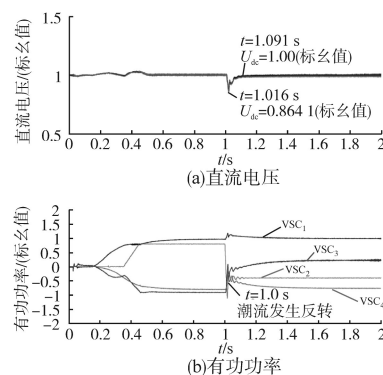


图 13 改进下垂控制波形图

Fig.13 Improved droop control waveforms

对比图 12 和图 13 中直流电压与有功功率的波形可知,多端系统发生潮流反转,系统直流电压发生跌落,由于换流站采用了下垂控制,下垂控制端重新分配功率以维持系统稳定运行。在这种情况下,传统下垂控制直流电压瞬时下降至 0.82(标么值),经 0.096 s 恢复至额定电压;改进下垂控制直流电压瞬时下降至 0.86(标么值),经 0.091 s 恢复至额定电压。可见,传统下垂控制直流电压跌落更深,改进下垂控制恢复速度更快,在系统发生潮流反转时,改进下垂控制策略对维持系统稳定运行效果更佳。

4 结论

本文提出一种改进下垂控制策略,通过监测下垂控制换流站直流电压及有功功率的偏差值,引入影响因子并设置电压滞环,自适应修正下垂系数,从而达到功率突变情况下稳定系统直流电压的目的。该方案能够有效抑制下垂系数的频繁波动,且计算相对简单,能够有效提高功率恢

复速度,维持直流电压恒定。

基于 Matlab/Simulink 搭建四端 VSC-MTDC 仿真模型,验证提出的改进下垂控制的运行效果。系统在发生潮流反转、主/从站退出运行等功率突变的情况下,改进下垂控制策略可以有效地抑制直流电压的陡增或跌落,并以相对较快的速度进行功率平衡,从而提高系统运行的稳定性,满足系统 $N-1$ 法则。

参考文献

- [1] 赵巧玲. VSC-MTDC 故障穿越及协调控制研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [2] 赵学深, 彭克, 张新慧, 等. 多端柔性直流配电系统下垂控制动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 89-101.
- [3] 成龙, 金国彬, 王利猛, 等. 考虑功率裕度和电压偏差的多端直流配电网自组织下垂控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 81-89.
- [4] 邵俊人, 陈思奇. 直流电压系统自适应下垂控制[J]. 云南电力技术, 2018, 46(4): 27-31.
- [5] 陈朋, 李梅航, 严兵, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的通用控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 47-52.
- [6] 李海峰, 刘崇茹, 李庚银, 等. 适用于柔性高压直流输电网的直流电压下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21):

40-46.

- [7] 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.
- [8] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 P-V 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 408-415.
- [9] 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.
- [10] 米根锁, 湛杰, 高磊, 等. VSC-MTDC 系统下垂控制优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(1): 101-107.
- [11] 陈大鹏, 陈朋, 李梅航, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的优化下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 194-199.
- [12] 王炜宇, 李勇, 曹一家, 等. 参与电网调频的多端柔性直流输电系统自适应下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 142-149.
- [13] 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.
- [14] 陈朋, 李梅航, 严兵, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的灵活下垂控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3433-3440.

收稿日期: 2020-03-26

修改稿日期: 2020-05-06

(上接第 58 页)

- [5] Li T, Gole A M, Zhao C. Harmonic Instability in MMC-HVDC Converters Resulting from Internal Dynamics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1738-1747.
- [6] 黄云辉, 周翩, 王龙飞. 弱电网下基于矢量控制的并网变换器功率控制稳定性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 93-99.
- [7] 吴广禄, 周孝信, 李亚楼, 等. 弱交流电网条件下 VSC-HVDC 改进矢量控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4577-4590.
- [8] Guo C, Liu W, Zhao C, et al. A Frequency-based Synchronization Approach for the VSC-HVDC Station Connected to a

Weak AC Grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1460-1470.

- [9] 王烨, 宁琳如, 赵成勇, 等. VSC-HVDC 联接弱交流系统下的新型附加频率阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2989-2998.
- [10] 吴广禄, 周孝信, 王姗姗, 等. 柔性直流输电接入弱交流电网时锁相环和电流内环交互作用机理解析研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2622-2633.

收稿日期: 2018-08-09

修改稿日期: 2018-10-01