

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230725

储能型 STATCOM 的优化电压支撑控制策略

吴娜, 赵成勇, 许建中

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 针对高压直流输电系统受端换流站发生接地故障时暂态电压失稳问题, 提出一种综合故障检测与有功无功输出的储能型链式静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)控制策略。储能型 STATCOM 具有功率四象限运行能力, 通过协调装置输出的有功、无功功率可以优化电压支撑效果。首先, 改进了故障检测方法, 采用双重检测快速判断故障起止时刻。其次, 在故障期间控制储能型 STATCOM 输出一定量的有功功率, 可以有效抑制受端连续换相失败, 抬升交流电压最低值。同时, 对无功功率进行控制切换, 避免故障清除后无功回撤不及时导致的受端暂态过电压问题。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台的 CIGRE 标准系统中对所提电压支撑控制策略与储能型 STATCOM 常规控制进行对比。结果表明, 在不同故障场景中, 所提控制策略均能达到更好地电压支撑的效果。

关键词: 储能型 STATCOM; 故障检测; 换相失败; 无功切换策略; 暂态过电压

Optimized voltage support control strategy for energy storage STATCOM

WU Na, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: A comprehensive fault detection and active/reactive power output control strategy for energy storage STATCOM is proposed, which addresses the issue of transient voltage instability caused by grounding faults at the receiving-end converter station in high-voltage direct current (HVDC) transmission systems. The energy storage STATCOM possesses the capability of four-quadrant power operation, and by coordinating the active and reactive power output of the device, the voltage support effect can be optimized. First, an improved fault detection method is introduced, which utilizes dual detection to quickly determine the start and end times of faults. Second, during the fault period, the energy storage STATCOM is controlled to output a certain amount of active power, effectively suppressing continuous commutation failures at the receiving end and raising the minimum value of the AC voltage. Simultaneously, control switching of reactive power is implemented to avoid transient overvoltage issues at the receiving end caused by delayed reactive power withdrawal after fault clearance. The proposed voltage support control strategy is compared with conventional control of energy storage STATCOM using the PSCAD/EMTDC simulation platform based on the CIGRE standard system. The results indicate that the proposed control strategy achieves optimized voltage support effects in different fault scenarios.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52277094).

Key words: energy storage STATCOM; fault detection; commutation failure; reactive power switching strategy; transient overvoltage

0 引言

碳达峰与碳中和目标的提出, 标志着新能源发

电技术成为未来的主要发展方向, 采用直流输电系统进行远距离送电是必然的选择^[1-4]。大量新能源接入电网, 对直流输电系统的稳定构成了巨大挑战。火电支撑少、负荷水平重的弱直流受端系统, 其暂态电压稳定问题尤为突出。因为受端母线电压不稳定, 极易引起直流连续换相失败^[5]。针对这一问题,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52277094); 国家电网公司总部科技项目资助(5500-202158475A-0-5-ZN)

工程上多采用安装无功补偿装置的方式来支撑母线电压。与传统的补偿装置电容器相比，链式静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)具备模块化程度高、动态响应快、可靠性好等优点^[6-9]。但是 STATCOM 运行过程中存在少量的有功损耗，需要从电网中吸收有功功率来维持自身稳定。当电网侧发生不对称故障时，负序电压的作用使得 STATCOM 子模块电容电压不均衡，影响装置稳定运行，因此 STATCOM 需要添加相间均衡与相内均衡控制，增加了系统控制的复杂度^[10-11]。对应用于新能源外送的直流输电系统受端电网而言，带储能系统的静止同步补偿器(储能型 STATCOM)比传统的 STATCOM 更具优势^[12]。储能型 STATCOM 具有功率四象限运行能力，可以发出无功支撑网侧电压。储能模块可以维持直流电容电压稳定，装置无须从电网吸收有功功率，自身稳定性大幅提高，在必要时可以发出有功功率对电网进行补偿^[13-14]。

故障识别与保护是直流输电系统控制的重要组成部分^[15]。对电网暂态过程的判断是无功补偿装置针对性地发挥作用的基础，而目前多采用电网电压有效值与参考值比较的方式判断，判据单一且快速性与准确性不够，容易误判。通常认为高压直流输电系统通过调整自身控制策略^[16]或者利用无功补偿装置在暂态过程中发出无功，从而支撑电压，抑制换相失败^[17-19]。文献[20-21]从器件和系统两方面阐述了换相失败的机理，指出利用无功补偿设备支撑交流母线电压是抵御换相失败的重要措施之一。文献[22-23]对多馈入直流系统进行了分析，指出直流间的交互作用对换相失败的影响源于换流站间的电压交互影响，通过补偿无功可以支撑电压，从而抑制换相失败。然而也有文献证明在换相失败恢复期间，无功补偿装置出力可能产生负面影响，导致后续换相失败^[24]。除了利用无功补偿装置抑制换相失败，文献[25]通过对储能电站有功出力时间与幅值进行设置来抑制直流后续换相失败，但是该控制策略判断过于繁琐，需要根据直流电流值进行不同阶段触发判断，且仅考虑了有功功率的作用。

此外，随着网侧故障清除，网侧电压急速回升，储能型 STATCOM 也存在无功回撤不及时导致网侧电压异常升高的问题，加剧电压振荡，影响网侧电压稳定性。文献[26]采用 PI 控制与滑模控制切换的控制策略提高系统的电压稳定性，但是滑模控制中滑模面的计算较为复杂。

为优化暂态下储能型 STATCOM 的电压支撑效果，首先改进了故障检测方法，采用双重检测加快对故障起止时刻的判断。在此基础上提出一种储能

型 STATCOM 有功无功协调控制策略。在故障期间输出有功抑制后续直流换相失败，对无功输出控制策略进行切换，在支撑电压的同时降低故障清除后的暂态过电压。与储能型 STATCOM 常规控制相比，采用所提策略后高压直流输电系统受端母线故障电压升高，故障清除后的暂态过电压降低，电压支撑效果得到优化。在 PSCAD/EMTDC 平台上对所提的控制策略进行了仿真验证。

1 储能型 STATCOM 模型

本文中储能型 STATCOM 采用星形链式结构，电池模块与 STATCOM 级联 H 桥通过双有源全桥(dual-active-bridge, DAB)隔离型 DC/DC 变换器连接。

1.1 储能型 STATCOM 拓扑与工作原理

储能型 STATCOM 基本结构如图 1 所示。图中 STATCOM 采用星形链式连接，STATCOM 每相经电抗器与电网相连，实现换流器与电网功率交换。由多个级联 H 桥串联组成的 STATCOM 拓扑具有高度可扩展性，同时可实现大容量无功功率调节。与储能模块连接后，每个单元仍具有模块化、拓展性强的特点。而且，利用隔离型 DC/DC 变换器连接储能单元的方式，保障了装置主体换流器的绝缘性与安全性。储能型 STATCOM 在运行过程中可断开与隔离型变换器的连接，实现无储能 STATCOM 的无功调节功能，也可以连接储能装置，实现功率四象限运行^[27-28]。

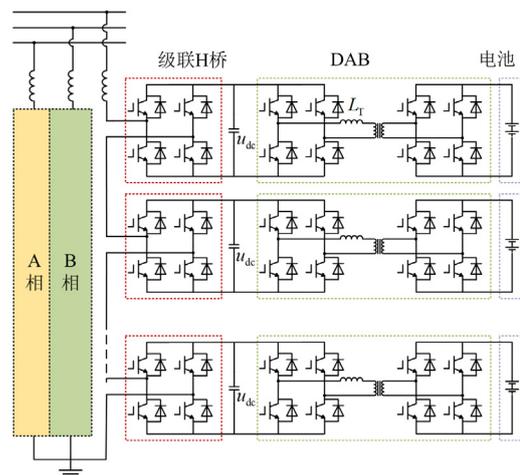


图 1 储能型 STATCOM 系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of energy storage STATCOM system

在功率四象限运行过程中，级联 H 桥即 DC/AC 变换器实现装置的有功、无功控制。直流侧电容作为储能模块与级联 H 桥之间的桥梁，电容电压会根据功率指令变化。利用隔离型 DC/DC 变换器控制

电容电压恒定, 将功率指令传达给电池, 实现电池的充放电控制。其中, 级联 H 桥采用 SPWM 调制, 功率指令经双闭环解耦控制得到调制波, 经 SPWM 调制得到级联 H 桥触发信号。DC/DC 变换器采用 PWM 调制, 通过电容电压控制改变高频变压器两侧桥臂触发信号的移相角, 从而控制功率的流动。改变移相角的大小可调节所传递功率的数值, 而改变移相角的正负值(即两侧桥臂触发信号的超前滞后关系)可以改变功率的流动方向。

储能型 STATCOM 与 CIGRE 模型连接电路如图 2 所示。并联储能单元的子模块可以看作是电压幅值与相位均可调节的电压源。通过控制级联单元中 IGBT 的开通与关断, 可以实现与电网间的能量交互。

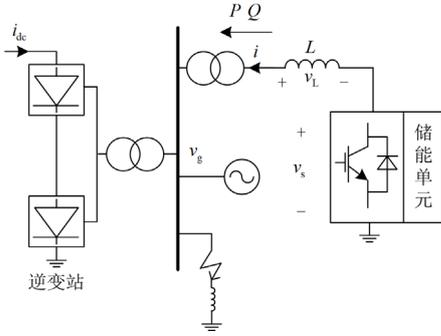


图 2 储能型 STATCOM 连接电路图

Fig. 2 Energy storage STATCOM connection circuit diagram

图 2 中, L 为连接电抗, v_g 为电网电压, v_s 为储能型 STATCOM 的输出电压, v_L 为连接电抗器上的电压降, i 为装置输出电流, P 、 Q 分别为装置输出的有功功率与无功功率, i_{dc} 为系统直流电流。

根据基尔霍夫定律得到电网电压与装置电压的关系, 可表示为

$$\dot{v}_g = \dot{v}_s + \dot{v}_L \quad (1)$$

$$\dot{v}_L = j\omega L \dot{i} \quad (2)$$

假设网侧电压 $\dot{v}_g = V_g \angle 0^\circ$, 装置输出电压 $\dot{v}_s = V_s \angle -\delta$, δ 为网侧电压与装置电压相位差。根据电压源换流器特性, 功率与电压相角间的关系可表示为

$$P = \frac{V_g V_s}{\omega L} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{V_g (V_g - V_s \cos \delta)}{\omega L} \quad (4)$$

当装置输出电压幅值与相位变化时, 得到如图 3 所示的四象限运行特性。

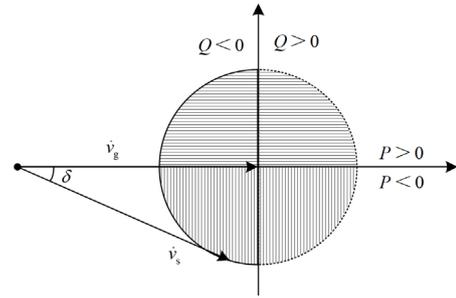


图 3 储能型 STATCOM 功率四象限运行特性

Fig. 3 Operation characteristics of energy storage STATCOM in four quadrants

1.2 储能型 STATCOM 控制

假设电网电压三相对称, 各相参数相同, 储能型 STATCOM 内部各子模块完全相同, 则网侧三相电压 v_{ga} 、 v_{gb} 、 v_{gc} 与装置输出三相电压 v_{sa} 、 v_{sb} 、 v_{sc} 之间的关系式为

$$\begin{cases} v_{ga} = L \frac{di_a}{dt} + v_{sa} \\ v_{gb} = L \frac{di_b}{dt} + v_{sb} \\ v_{gc} = L \frac{di_c}{dt} + v_{sc} \end{cases} \quad (5)$$

式中, i_a 、 i_b 、 i_c 分别为装置输出的三相电流。

利用派克变换将其转换至两相旋转坐标系中, 网侧三相电压经过 dq 变换后得到 v_{gd} 、 v_{gq} , 装置三相电压变换得到 v_{sd} 、 v_{sq} , 对应方程变换为

$$\begin{cases} v_{gd} = L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + v_{sd} \\ v_{gq} = L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + v_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

式中, i_d 、 i_q 分别为装置电流的 d 、 q 轴分量, 对其进行前馈解耦控制后, d 、 q 轴控制环相互独立, 有功无功功率可以单独控制。系统内环控制框图如图 4 所示。

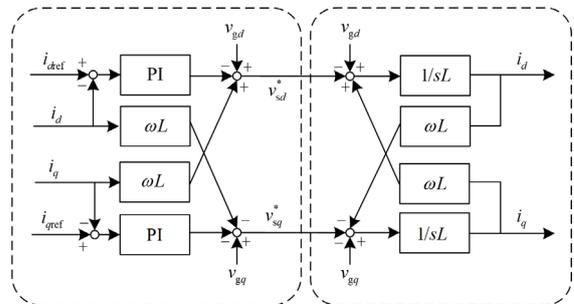


图 4 内环电流控制框图

Fig. 4 Block diagram of inner loop current control

d 轴主要控制有功功率, q 轴控制无功功率。有功指令值与实际值作差后经 PI 环节生成装置 d 轴电流参考值 i_{dref} , 无功采用定电压控制或定无功功率开环控制生成 q 轴电流参考值 i_{qref} 。 dq 轴参考值经电流内环控制生成 PWM 调制信号。

由图 5 所示的储能型 STATCOM 有功无功控制策略可知, 无功控制可分为定电压控制与定无功功率控制, 储能型 STATCOM 经变压器与网侧母线连接。定电压控制原理: 取母线电压有效值与参考值作差后, 经过 PI 调节得到 q 轴电流参考值。设置母线电压额定值为 1 p.u., 当网侧电压变化时, 储能型 STATCOM 可以根据电压差值对无功功率进行自主调节。

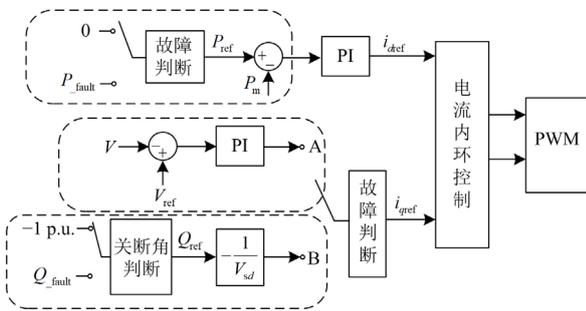


图 5 储能型 STATCOM 有功无功控制策略

Fig. 5 Energy storage STATCOM active and reactive power control strategy

定无功功率控制原理如下。由瞬时功率理论, 装置输出的有功无功实际值 P_m 、 Q_m 可表示为

$$\begin{bmatrix} P_m \\ Q_m \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} v_{gd} & v_{gq} \\ v_{sq} & -v_{gd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

设置 d 轴与网侧电压空间矢量重合, 因此稳态下网侧电压 d 轴分量 v_{gd} 等于相电压幅值, q 轴分量 v_{gq} 等于零。通过给定无功功率参考值 Q_{ref} 得到网侧电流 q 轴分量与无功功率的关系, 可表示为

$$i_{qref} = -\frac{2 Q_{ref}}{3 v_{gd}} \quad (8)$$

经过标么化处理, q 轴电流参考值可以通过无功功率计算得到。在暂态过程中网侧三相电压不平衡, $v_{gd} < 1$ p.u., 因此通过开环计算得到的 i_{qref} 偏大, 限流环节的存在使得 i_{qref} 最大为 1 p.u., 保证了装置运行在正常范围内。采用定无功功率控制时, 无功功率为开环控制, 无 PI 延时, 控制响应速度快。

储能型 STATCOM 常规控制方式为: 无论系统处于稳态或暂态, 储能型 STATCOM 输出有功控制为零, 无功输出采用定母线电压控制, 使母线电压

维持在额定值。

2 储能型 STATCOM 的电压支撑策略

储能型 STATCOM 的优化电压支撑策略如图 5 所示, 主要分为故障检测、有功控制策略和无功切换策略 3 个部分。

2.1 故障检测方法

作为稳态控制与暂态控制切换的基础, 高压直流输电系统中, 故障检测应具备快速性与广泛适用性, 在系统受端发生不同程度扰动时均能快速判断。本文提出一种采用双重判据的故障检测方法, 如图 6 所示。

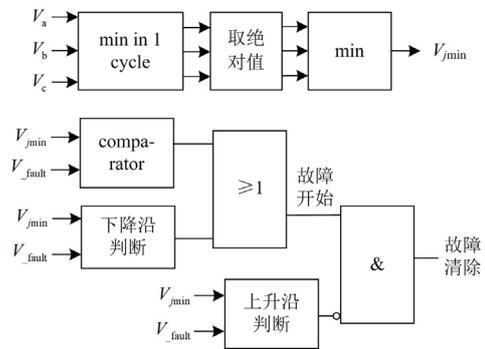


图 6 故障检测策略

Fig. 6 Fault detection strategy

一般情况下, 仅通过换流站母线电压有效值 V_{rms} 与 V_{fault} 进行比较判断(V_{fault} 一般取 0.9 p.u. 作为参考值), 当 V_{rms} 低于 V_{fault} 时, 判断为大扰动或故障情况。高压直流输电系统中发生的故障类型大概率为单相接地故障, 故障发生地点与换流站距离可用接地电感大小表征。当距离较远, 接地电感值较大时, 母线电压有效值变化较平缓, 使得故障判断尤其是故障清除时刻的判断反应迟缓。

本文增加了单相电压幅值变化判断, 利用各相电压幅值最小值 (V_{jmin}) 的变化方向对故障的发生与清除进行针对性判断。稳态下母线电压实际值在 (-1,1) p.u. 之间波动, 当发生单相接地故障时(以 a 相经 0.04 H 电感接地为例), 故障相电压波动范围为 (-0.5,0.5) p.u., 电压幅值最低值从 -1 p.u. 抬升至 -0.5 p.u., 取绝对值后表现为从 1 降至 0.5, 电压波形中有一个清晰的下降沿。在故障清除时, 同理有一个明显的上升沿, 因此采用单相电压幅值变化判断可以快速准确地识别故障起止时刻。对于三相接地故障等严重故障, 电压跌落速度快, 单相电压幅值变化检测没有电压有效值判断反应迅速, 但是对故障清除时刻更敏感。

因此本文利用单相电压幅值的波形变化与母线电压有效值协同判断故障起止时刻。当单相电压幅值最小值($V_{j,\min}$)产生下降沿低于 V_{fault} 或者 V_{rms} 低于 V_{fault} 时,判断为故障发生;当 $V_{j,\min}$ 产生上升沿高于设置值时,判断为故障结束。

2.2 有功控制策略与作用机理

储能型 STATCOM 可以实现功率四象限运行,将其作为电压支撑设备连接至高压直流输电系统逆变站母线处,如图 2 所示。经研究发现,在逆变站发生故障时,储能型 STATCOM 按指令值输出一定量的有功有助于抑制连续换相失败。

为探索有功作用机理,设置装置输出无功为 0,排除无功支撑电压的影响。同时,为排除电容电压波动与 DC/DC 变换器内部损耗的影响,在仿真中用电压源代替 DC/DC 变换器与储能部分,简化后子模块结构如图 7 所示。本节所提到的储能型 STATCOM 均为由级联 H 桥与直流电压源并联组成的简化链式,整体连接方式同图 2。

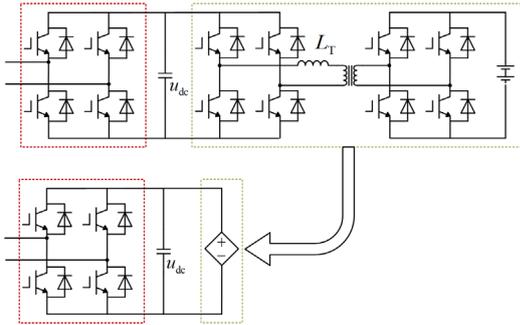


图 7 简化模型子模块拓扑图

Fig. 7 Simplified submodule topology

设置 CIGRE 高压直流标准测试系统逆变侧母线在 1.2~1.3 s 期间经 0.04 H 电感发生 b 相接地故障。储能型 STATCOM 的额定容量为 200 MVA,额定电压为 35 kV,经 230 kV/35 kV 变压器连接在 CIGRE 系统逆变侧母线处。依据 2.1 节故障判断,稳态下装置输出有功为零,故障下输出有功切换为指令值,无功输出持续保持为 0。设置有功功率 P 取 10 组不同参数, P 从 -0.1 p.u. 递增至 -1 p.u. (负号代表输出有功,仿真模型中的方向与图 2 中所示方向相反)。同时,设置不含补偿装置的 CIGRE 对照组,在图中用标记“无”来表示。

图 8 为故障情况下,上述 11 组模型中 CIGRE 系统逆变站关断角波形图。由换相失败原理可知,当逆变侧关断角低于 7° 时,可认定为换相失败^[29]。

由图 8 可见,不含补偿装置时 CIGRE 系统换相失败 3 次,而当储能型 STATCOM 有功功率

$P = -0.4$ p.u. 时,换相失败次数减少至 1 次,有效抑制了连续换相失败,提高了故障期间逆变侧交流电压见图 9。

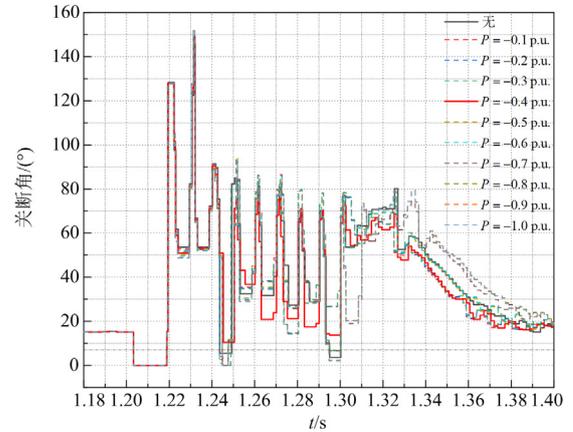


图 8 不同有功输出值下逆变侧关断角仿真波形图

Fig. 8 Simulation waveform of inverter side turn-off angle under different active power output values

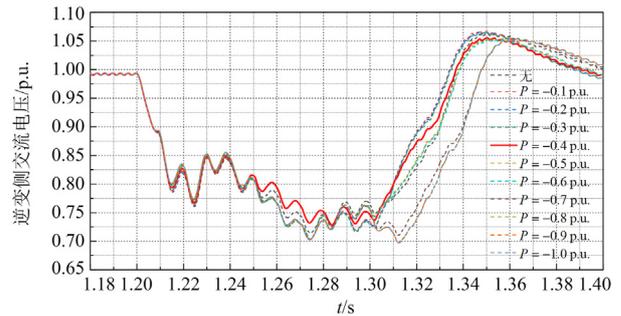


图 9 不同有功输出值下逆变侧交流电压波形图

Fig. 9 AC voltage waveform of the inverter side under different active power output values

常规高压直流输电系统逆变侧控制包含定关断角控制与定直流电流控制。当稳态运行时采用定关断角控制,故障过程中直流电流剧烈变化,定关断角控制与定电流控制交替投入,改变触发角信号从而调整暂态工作状态,使关断角快速恢复稳定。其中,直流电压、直流电流与关断角的关系可表示为

$$I_{\text{dc}} = \frac{U_{\text{dor}} \cos \alpha - U_{\text{doi}} \cos \beta}{R} \quad (9)$$

$$U_{\text{doi}} = 1.35 U_{\text{aci}} \cos \gamma - (3/\pi) X_i I_{\text{dc}} \quad (10)$$

式中: U_{dor} 、 U_{doi} 分别为整流侧、逆变侧理想空载直流电压; R 为直流回路电阻; U_{doi} 为逆变器的直流电压; U_{aci} 为逆变器的换相线电压有效值; γ 为逆变站关断角; X_i 为逆变器的等值换相电抗; I_{dc} 为直流电流; α 为整流站触发角; β 为逆变站超前触发角。

由式(10)可知,当 I_{dc} 降低时 γ 增大,换相条件改善,从而抑制换相失败。

图 10 为整流侧与逆变侧触发角指令,在首次换相失败 $t = 1.22$ s后,第二次换相失败 $t = 1.25$ s前, $P = -0.4$ p.u.时整流侧触发角信号 α 与其余情况基本相同,而逆变侧触发指令值明显高于无装置下 CIGRE 模型,即超前触发角 β 明显偏小。由式(9)可知,直流电流 I_{dc} 降低,与理论分析相符,直流电流波形图,如图 11 所示。

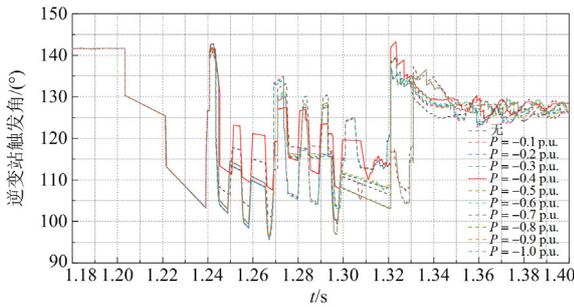
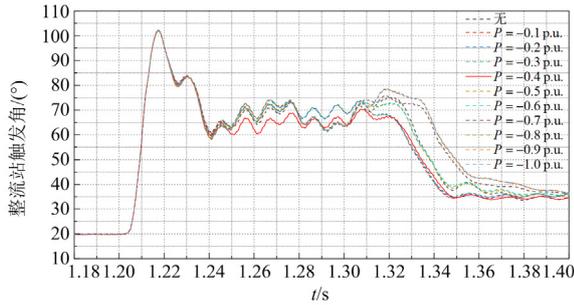


图 10 不同有功输出值下触发角波形图

Fig. 10 Simulation waveform of trigger angle under different active power output values

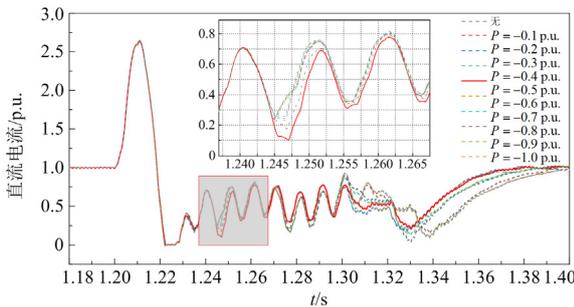


图 11 不同有功输出值下直流电流波形图

Fig. 11 DC current waveform under different active power output values

因此,储能型 STATCOM 输出的有功有助于增大逆变侧触发角指令值,降低直流电流值,改善换相条件,从而抬升故障期间交流电压值,与无功功

率支撑电压作用机理并不相同。

2.3 无功切换控制策略

采用定电压控制时,故障后网侧电压跌落,储能型 STATCOM 输出无功支撑电压。当故障清除时,网侧电压上升,储能型 STATCOM 输出无功有一瞬间激增,由式(4)可知,装置输出无功增大会导致系统过电压,而后由定电压控制逐渐恢复至电压参考值。在此过程中,装置输出电流经较长周期才能恢复,不利于系统电压稳定运行。考虑到定无功控制中不含 PI 环节,可以实现对无功功率的快速调控,因此基于 2.1 节故障快速检测,故障发生时切换至定无功功率控制模式,故障清除后切换回定电压控制模式。当发生小扰动时,装置发出无功增大导致系统过电压的现象并不明显,因此提出的切换策略仅在网侧电压跌落程度较深时启用。具体启动条件可通过设置 V_{fault} 的值进行调整。切换策略如图 12 所示。

图 12 中,mode = A 代表定电压控制模式,mode = B 代表定无功功率模式。

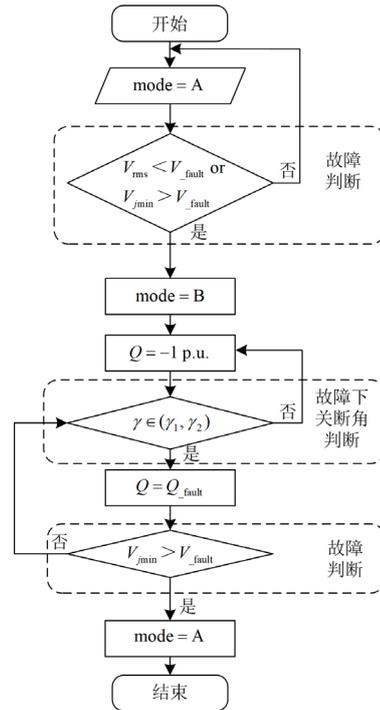


图 12 无功切换策略逻辑图

Fig. 12 Logic diagram of the reactive power switching strategy

通过监测电压变化,在大扰动发生时由定电压控制模式切换为定无功控制模式,此时无功功率设置为 -1 p.u.,即以额定容量输出无功。当故障清除时,由定无功功率控制切换回定电压控制,并对此前定电压模式中 PI 环节积累数据清零,便于定电压控制快速反应。根据文献[24]的研究,故障期间无功大功率输出对触发控制角可能产生负面影响,导

致连续换相失败, 故其设置换相恢复期间无功补偿装置输出为零, 并持续 40 ms。本文考虑到无功输出为零会降低装置的电压支撑能力, 因此在故障期间添加关断角检测, 当检测到关断角在恢复期间时, 调节无功输出指令值, 设置 $Q_{\text{fault}} = -0.5 \text{ p.u.}$ 。

结合整体控制图与故障检测原理, 通过故障快速检测确定故障起止时刻, 在故障期间切换到定无功控制, 同时对关断角进行判断从而确定无功功率指令值。

3 仿真验证

3.1 对故障检测机制的验证

电力系统中故障过程十分迅速, 但是控制系统检测到故障的发生或清除需要一定时间, 检测时间越短, 越有利于系统稳定。为表征 2.1 节所提双重故障检测方法的效果, 将其与仅采用母线电压有效值监测的单一故障检测方法进行对比。记录了不同故障情况下, 两种方法对故障发生与故障清除的检测时间, 以单一检测方法的检测时间为标准, 将双重检测方法的检测时间与其作差后相除得到百分比, 表 1 即为处理后的数据, 分别比较了不同故障工况下故障发生所需的检测时间, 与故障清除所需的检测时间, 得到相应百分比。

故障设置为 CIGRE 标准模型中逆变站母线各相经不同数值的电感接地, $V_{\text{fault}} = 0.9 \text{ p.u.}$ 。

表 1 故障检测策略效果对比

Table 1 Effect comparison of fault detection strategies

故障条件 (接地相- 接地电感)	故障持续时间 0.1 s			故障持续时间 0.2 s		
	电压最 低值/p.u.	故障发 生检测 /%	故障清 除检测/%	电压最 低值 /p.u.	故障发 生检测 /%	故障清 除检测/%
a-0.6 H	0.825	-6.1	0	0.82	-6.1	波动
a-0.1 H	0.80	-13.4	波动	0.78	-14	波动
a-0.04 H	0.73	0	-27.3	0.71	0	-35.3
a-0.01 H	0.62	0	-41.2	0.6	0	-24.8
ab-0.6 H	0.5	0	-15.8	0.48	0	-14.8
ab-0.1 H	0.45	0	-0.9	0.44	0	-18.9
ab-0.04 H	0.4	0	-8.6	0.4	0	-21.6
ab-0.01 H	0.31	0	-7.6	0.3	0	-30.5
abc-0.6 H	0	0	-49.1	0	0	-49.9

由表 1 数据可知, 当电压跌落程度较低时, 所提故障检测策略可以减少故障发生的检测时间; 当电压跌落程度较高时, 可以快速检测到故障清除, 根据故障场景变化, 所需检测时间的减少幅度为 1%~50%。因此, 所提检测策略可以从故障发生与清除两个方面加快检测速度。此外, 直流输电系统在小扰动下, 或者经过无功补偿装置作用后, 受端

母线电压有效值可能在 0.9 p.u.附近波动, 影响故障清除时刻的判断, 采用所提协同判断策略可以降低误判风险。

3.2 对有功作用效果验证

2.2 节为探究有功作用机理, 采用电压源模型并设置输出无功为零。为验证在储能型 STATCOM 暂态输出无功支撑电压的情况下, 输出一定量的有功有助于抑制连续换相失败, 设置电压源模型的无功控制为本文所提无功切换控制策略, 在不同故障条件下进行仿真, 得到换相失败次数仿真数据。表 2 为 CIGRE 标准测试模型在无支撑装置(即不含无功补偿装置)与添加储能型 STATCOM 装置下, 逆变侧发生接地故障的换相失败次数对比, 故障条件设置为逆变侧母线处发生 a 相经 0.01 H 或 0.04 H 电感接地, 故障持续时间为 0.1 s, 在故障发生时刻不同的情况下, 得到不同有功输出量下的换相失败次数, 从而验证有功作用效果。

如表 2 所示, 当发生 a 相接地故障时, 不含无功补偿装置的 CIGRE 模型会发生 2 次及以上的换相失败, 而在添加储能型 STATCOM 的 CIGRE 模型中, 储能型 STATCOM 在保持无功输出的情况下, 输出 0.5 p.u.的有功功率可以有效抑制连续换相失败, 换相失败次数均减少至 1 次, 无后续连续换相失败, 优化了电压支撑效果。当发生三相接地故障时, 所设故障条件下 CIGRE 模型会发生 3 次换相失败, 而添加储能型 STATCOM 后, 控制其输出合适的有功功率后可以抑制后续换相失败。

表 2 电压源模型有功无功协同出力作用效果

Table 2 Effect of active power and reactive power synergistic output in voltage source model

	1.2~1.3 s		1.25~1.35 s		1~1.1 s		1.1~1.2 s	
	单相接地		单相接地		三相接地		三相接地	
	0.01 H	0.04 H	0.01 H	0.04 H	0.04 H	0.04 H		
无支撑装置	2	2	4	2	3	3		
$P = -0.1 \text{ p.u.}$	3	3	2	2	1	1		
$P = -0.2 \text{ p.u.}$	3	3	2	2	3	1		
$P = -0.3 \text{ p.u.}$	3	3	2	2	3	1		
$P = -0.4 \text{ p.u.}$	3	3	2	2	3	1		
$P = -0.5 \text{ p.u.}$	1	1	1	1	3	3		
$P = -0.6 \text{ p.u.}$	3	3	3	3	3	3		
$P = -0.7 \text{ p.u.}$	3	3	3	3	3	3		
$P = -0.8 \text{ p.u.}$	3	3	3	3	3	3		
$P = -0.9 \text{ p.u.}$	3	3	3	3	3	3		
$P = -1.0 \text{ p.u.}$	2	2	2	2	3	3		

3.3 对所提电压支撑策略的详细模型验证

上述 2.2 节与 3.2 节为简化分析, 储能型 STATCOM 均采用电压源代替储能部分, 本节采用

电池串联 DAB 环节的详细模型经变压器连接至 CIGRE 标准测试模型逆变站母线处,用于验证电压支撑策略的有效性,系统模型参数见表 3。

设置故障为逆变侧母线在 1.2~1.3 s 时经 0.04 H 电感发生 a 相接地故障,共设置 3 组模型进行仿真对比。模型 1: 无补偿装置的 CIGRE 模型;模型 2: CIGRE 连接储能型 STATCOM 详细模型,故障期间采用常规控制策略,即定电压控制,有功功率设置为零;模型 3: CIGRE 连接储能型 STATCOM 详细模型,故障期间采用所提有功无功控制策略,其中 $P_{\text{fault}} = -0.5 \text{ p.u.}$, $Q_{\text{fault}} = -0.5 \text{ p.u.}$, $\gamma_1 = 32^\circ$, $\gamma_2 = 60^\circ$ 。仿真波形如图 13 所示。

表 3 系统仿真参数

Table 3 System simulation parameters

参数	数值	DAB参数	数值
低压侧线电压有效值/kV	35	额定容量/MVA	5
连接电感L/mH	2	连接电感 L_T /mH	0.01
系统额定容量/MVA	200	开关频率/Hz	20 000
子模块级联个数N	15	变比	1:1
电池额定电压/kV	2.3		
子模块电容C/mF	10		
载波频率/Hz	1000		

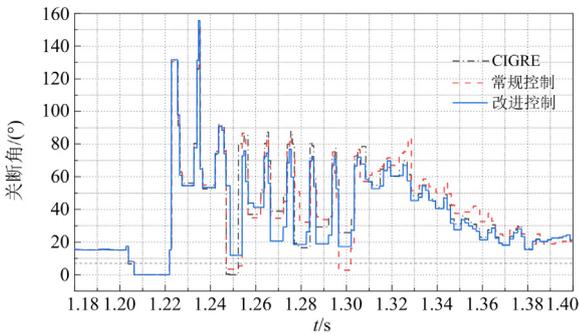


图 13 不同控制策略下关断角波形图

Fig. 13 Waveforms of turn-off angles under different control strategies

由图 13 可见,无补偿装置的 CIGRE 模型换相失败 2 次。当采用改进控制策略后,系统逆变侧换相失败次数减少为 1 次。采用常规控制策略的储能型 STATCOM 会使系统换相失败 3 次,侧面证明无功补偿装置有可能恶化换相失败条件,而采用所提有功无功控制策略可以有效抑制后续换相失败。

图 14 为交流电压波形图。故障期间含补偿装置的 CIGRE 模型将交流侧电压最低值从 0.70 p.u. 抬升到 0.78 p.u.,而采用改进控制策略的模型由于成功抑制换相失败,交流电压最低值从 0.78 p.u. 进一步抬升至 0.80 p.u.,且整个故障过程中电压波动

幅度更小。在故障清除后采用常规控制策略的系统交流侧电压达到 1.11 p.u.,而采用改进后策略的系统电压为 1.05 p.u.,与无补偿装置的系统故障后电压基本持平。不同控制策略下储能型 STATCOM 输出电流波形如图 15 所示,由图 15 可以看出,当采用切换策略时,在检测到故障清除后装置输出电流幅值立刻减小一半,并在一个周波内减小为零,而采用常规控制时,在两个周波内仍维持电流输出不变,后经 3 个周波逐渐衰减至稳定值,电流调节速度极慢。因此采用无功切换策略后可以快速调节输出电流值,从而有效降低系统暂态过电压。

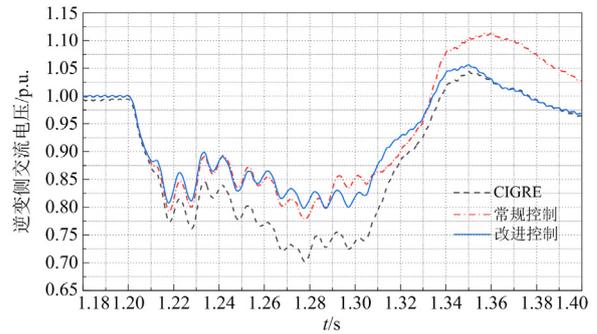


图 14 不同控制策略下交流电压波形图

Fig. 14 AC voltage waveforms under different control strategies

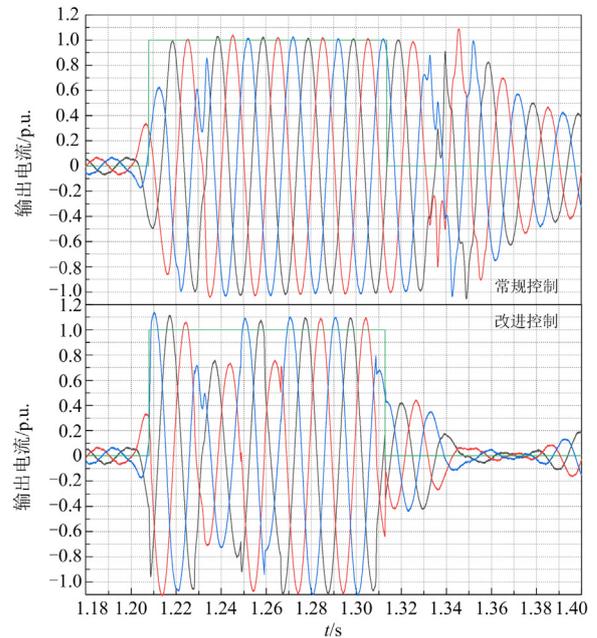


图 15 不同控制策略下储能型 STATCOM 输出电流波形图

Fig. 15 Current waveforms of energy storage STATCOM under different control strategies

需要注意的是,此时在故障期间设置装置输出有功功率 $P_{\text{fault}} = -0.5 \text{ p.u.}$ 、输出无功功率 $Q_{\text{fault}} =$

-1 p.u., 理论上装置输出电流会超出过载能力。而实际中由于故障期间交流侧电压降低, 且故障过程短暂, 无功功率调节也需要一定时间, 因此装置实际输出无功功率达不到参考值。另外, 关断角判断的存在使得无功功率指令值 $Q_{ref} \in [-1, -0.5]$ p.u., 因此仿真中装置输出电流未超额, 实际幅值为 1.1 p.u., 满足正常运行条件。

设置故障为逆变侧母线在 1~1.1 s 时经 0.04 H 电感发生三相接地故障, 设置 $P_{fault} = -0.1$ p.u., 其余条件均与 a 相接地故障相同, 仿真波形如图 16—图 18 所示。

由图 16 可以看出, 在三相接地故障情况下, 无补偿装置的 CIGRE 模型换相失败 3 次。采用常规控制策略的储能型 STATCOM 会使系统换相失败 2 次。采用改进控制策略后, 系统逆变侧换相失败次数减少到 1 次。由于常规策略下系统第 2 次换相失败时间较短, 且无第 3 次换相失败, 因此图 17 中故障期间改进控制下交流侧电压略高于常规控制, 但提升效果并不明显。故障清除后常规控制下暂态过电压最大为 1.07 p.u., 而改进控制下最大暂态过电压为 1.04 p.u.。图 18 为三相故障下储能型 STATCOM 输出电流波形图, 故障清除后系统仍需要大量无功恢复正常运行, 因此装置仍保持无功功率输出, 电流幅值不为零。常规控制下电流幅值保持为最大输出,

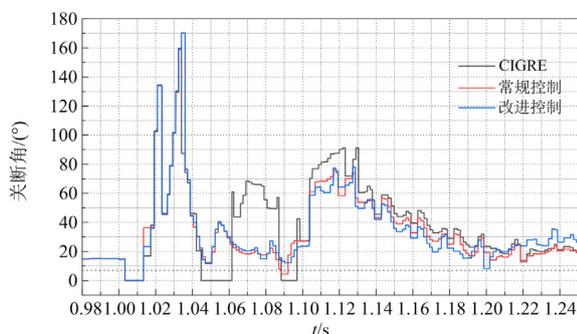


图 16 三相故障下关断角波形图

Fig. 16 Waveforms of turn-off angles under three-phase fault

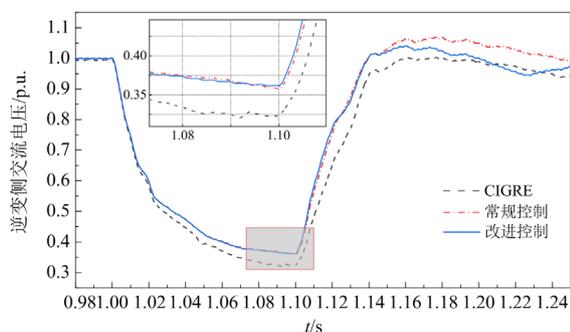


图 17 三相故障下交流电压波形图

Fig. 17 AC voltage waveforms under three-phase fault

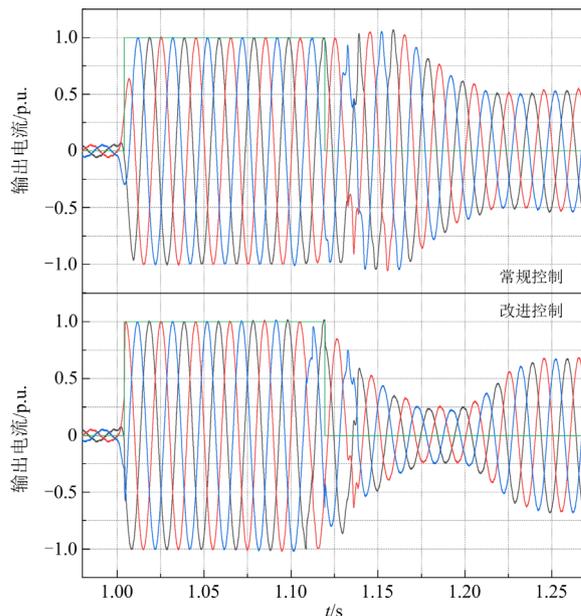


图 18 三相故障下储能型 STATCOM 输出电流波形图

Fig. 18 Current waveforms of energy storage STATCOM under three-phase fault

经 100 ms 达到平衡状态, 而改进控制下在 20 ms 左右检测到故障清除, 输出电流幅值经 40 ms 降低至最低值, 后逐渐升高至维持电压的平衡值。由以上仿真可以看出, 严重故障情况下所提策略能有效抑制后续换相失败, 但是网侧电压跌落程度太深导致支撑效果改善不太明显。

4 结论

针对高压直流输电系统受端换流站发生接地故障时的暂态电压失稳问题, 本文提出了一种综合故障检测与有功无功输出的储能型 STATCOM 电压支撑控制策略, 从提高故障电压最低值与降低暂态过电压两方面优化电压支撑效果, 具体结论如下:

1) 采用受端母线电压有效值与单相电压幅值协同判断的故障检测策略, 从故障发生与故障清除两方面提高了故障检测速度, 检测所需时间较单一检测方式缩短 1%~50%, 同时所提检测策略降低了电压波动情况下的误判概率, 有利于后续有功无功策略在故障期间的快速反应与切换。

2) 安装储能型 STATCOM 作为电压支撑设备的 CIGRE 模型, 在逆变侧故障期间储能型 STATCOM 输出一定量的有功功率有助于增大逆变侧触发角指令值、降低直流电流值、改善换相失败条件、抑制后续换相失败和提高故障期间电压最低值。

3) 采用无功功率切换策略的储能型 STATCOM 可根据需求调整故障期间输出的无功, 避免恶化换相

条件。基于对故障清除时刻的快速判断,可以灵敏调节输出电流,有效抑制逆变站交流侧暂态过电压。

参考文献

- [1] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.
- [2] 李欢, 傅闯, 辛清明, 等. 高压直流输电系统直流谐波阻抗的解析计算及谐振分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 67-79.
LI Huan, FU Chuang, XIN Qingming, et al. Analytical calculation of DC harmonic impedance and DC resonance analysis of an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 67-79.
- [3] 杨张斌, 李钢, 王仙荣, 等. 应用于海上风电柔性直流输电系统的灵活调压策略[J]. 供用电, 2022, 39(9): 76-82.
YANG Zhangbin, LI Gang, WANG Xianrong, et al. Flexible voltage regulation strategy for offshore wind farm with VSC-HVDC[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 76-82.
- [4] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.
LEI Zhaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.
- [5] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] KOURO S, MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2553-2580.
- [7] AKAGI H, INOUE S, YOSHII T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(4): 1041-1049.
- [8] 邢琛, 张新燕, 周鹏, 等. 链式 STATCOM 在双馈风电场中的谐波抑制研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 66-71.
XING Chen, ZHANG Xinyan, ZHOU Peng, et al. Research on harmonic suppression of chained STATCOM applied in doublyfedwind farm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 66-71.
- [9] 张一驰, 李志强, 王喆, 等. 基于频域、时域分析的新一代调相机与 STATCOM 对比及适用场景研究[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 69-77.
ZHANG Yichi, LI Zhiqiang, WANG Zhe, et al. Comparison and applicability of new generation synchronous condenser and STATCOM based on characteristic analysis in frequency and time domains[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 69-77.
- [10] 章小卫, 李耀华, 周京华, 等. 链式 STATCOM 的直流电容电压平衡控制策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(6): 1-4, 8.
ZHANG Xiaowei, LI Yaohua, ZHOU Jinghua, et al. Direct current capacitor voltage balancing control strategy for cascade STATCOM[J]. Power Electronics, 2019, 53(6): 1-4, 8.
- [11] 蒋泽虔, 陈卓, 郝正航, 等. 用于分布式风电的 LCL 型 STATCOM 控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 102-109.
JIANG Zeqian, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. A study on LCL-Type STATCOM control strategy for distributed wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 102-109.
- [12] 刘青, 徐宏璐, 李权. 基于 STATCOM/BESS 强化风机 VSG 虚拟惯性的协同控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 74-81.
LIU Qing, XU Honglu, LI Quan. Cooperative control strategy of wind turbine-VSG with enhanced virtual inertia based on STATCOM/BESS[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 74-81.
- [13] CHENG Y, QIAN C, CROW M L, et al. A comparison of diode-clamped and cascaded multilevel converters for a STATCOM with energy storage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1512-1521.
- [14] YANG Z, SHEN C, ZHANG L, et al. Integration of a STATCOM and battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 254-260.
- [15] HOU Junjie, SONG Guobing, FAN Yanfang. Fault identification scheme for protection and adaptive reclosing in a hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 403-419.
- [16] 曹善康, 魏繁荣, 林湘宁, 等. 一种基于自适应电压限值的换相失败抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 165-175.
CAO Shankang, WEI Fanrong, LIN Xiangning, et al. A commutation failure suppression strategy based on adaptive voltage limits[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 165-175.

- [17] 王轩, 魏宏, 欧朱建, 等. 一种抑制 HVDC 换相失败的 STATCOM 补偿方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 135-142.
WANG Xuan, WEI Hong, OU Zhujian, et al. A STATCOM compensation scheme for suppressing commutation failure in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 135-142.
- [18] 赵晓龙, 陈卓, 田霄, 等. 高压直流输电系统抑制连续换相失败的策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 185-190.
ZHAO Xiaolong, CHEN Zhuo, TIAN Xiao, et al. Research on the strategy of mitigate consecutive commutation failure for HVDC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 185-190.
- [19] 李志, 韩颖, 李岩松, 等. 换相失败下直流送端 SVC 无功反调机理分析及控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 153-159.
LI Zhi, HAN Ying, LI Yansong, et al. Mechanism analysis and control strategy research of SVC reactive power inversion of DC transmission system due to commutation failure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9): 153-159.
- [20] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 1-10.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 1-10.
- [21] 宋金钊, 李永丽, 曾亮, 等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 2-13.
SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, et al. Review on commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 2-13.
- [22] 李培平, 周泓宇, 姚伟, 等. 多馈入结构背景下的高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 834-850.
LI Peiping, ZHOU Hongyu, YAO Wei, et al. Review of commutation failure on HVDC transmission system under background of multi-infeed structure[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 834-850.
- [23] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 499-513, 647.
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513, 647.
- [24] 李培平, 姚伟, 高东学, 等. 基于电化学储能的多馈入直流系统暂态控制及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 1): 154-167.
LI Peiping, YAO Wei, GAO Dongxue, et al. Transient control and influencing factors analysis of multi-infeed HVDC system based on electrochemical energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 154-167.
- [25] 周泓宇, 李培平, 姚伟, 等. 抑制直流后续换相失败的电化学储能有功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 70-79.
ZHOU Hongyu, LI Peiping, YAO Wei, et al. Active power control strategy of electrochemical energy storage for mitigating subsequent DC commutation failures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 70-79.
- [26] 李东东, 安胜辉, 高毅. 应用于 LCC-HVDC 受端 STATCOM 的 PI 与滑模切换控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 56-64.
LI Dongdong, AN Shenghui, GAO Yi. PI and sliding mode switching control strategy of STATCOM for LCC-HVDC receiving station[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2023, 35(5): 56-64.
- [27] 金一丁, 宋强, 刘文华. 基于公共直流母线的链式可拓展电池储能系统及控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 66-70.
JIN Yiding, SONG Qiang, LIU Wenhua. Control and analysis of extensible cascaded battery energy storage system based on a common DC bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 66-70.
- [28] 毛苏闽, 蔡旭. 大容量链式电池储能功率调节系统控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 226-231.
MAO Sumin, CAI Xu. Control strategy for power conditioning system of large capacity cascaded battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 226-231.
- [29] 王璐, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 考虑直流电流变化的 HVDC 系统不对称故障换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 17-23.
WANG Lu, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Analysis of asymmetric fault commutation failure in an HVDC system with DC current variation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 17-23.

收稿日期: 2023-06-14; 修回日期: 2023-07-20

作者简介:

吴娜(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定; E-mail: wuna@ncepu.edu.cn

赵成勇(1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为柔性直流输电、高压直流输电。E-mail: chengyongzhao@ncepu.edu.cn

(编辑 许威)