

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240992

# 光伏接入下高压直流输电系统后续换相失败抑制策略研究

赵静波<sup>1</sup>, 钟文梁<sup>2</sup>, 安海云<sup>1</sup>, 刘健<sup>2</sup>, 林圣<sup>2</sup>

(1. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 211103; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 大量新能源发电系统接入高压直流输电系统受端电网势在必行, 然而鲜有研究涉及该场景下的高压直流后续换相失败抑制。首先, 针对光伏接入电网换相换流器型高压直流输电系统受端交流电网的场景, 分析了交流故障后光伏诱发电网换相换流器型高压直流输电系统后续换相失败的相关机理, 发现电网换相换流器型高压直流输电系统在首次换相失败恢复后易因光伏出力波动而出现超前触发角指令波动的问题。在此基础上, 提出了一种基于逆变侧控制指令波动平抑的后续换相失败抑制策略, 该策略在定电流、定关断角控制的基础上引入附加电流、关断角偏差, 可缓解超前触发角指令波动。最后, 结合 PSCAD/EMTDC 仿真软件在不同光伏装机容量、接入距离、故障位置下验证了所提抑制策略的有效性。

**关键词:** 高压直流输电系统; 后续换相失败; 新能源; 抑制策略

## Study on suppression strategy for subsequent commutation failure in HVDC transmission systems with photovoltaic integration

ZHAO Jingbo<sup>1</sup>, ZHONG Wenliang<sup>2</sup>, AN Haiyun<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>, LIN Sheng<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Research Institute Corporation Limited, Nanjing 211103, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** It has become a trend that large scale renewable energy power generation systems are connected to the receiving end grid of HVDC transmission systems. However, there is limited research on suppressing subsequent commutation failure in HVDC systems under such scenarios. First, in view of the scenario of PV connecting to the receiving end of LCC AC grid, the relevant mechanisms of subsequent commutation failure induced by PV after an AC fault are analyzed. It is found that after the initial commutation failure recovery, LCC experiences oscillations in the firing angle command due to PV output fluctuations. To address this, a subsequent commutation failure suppression strategy based on the suppression of inverter control command oscillations is proposed. By introducing additional current and extinction angle deviations into the constant current control and constant extinction angle control, the proposed method alleviates oscillations in the firing angle command. Finally, PSCAD/EMTDC simulations under different PV installation capacities, connection distances, and fault locations validate the effectiveness of the proposed suppression strategy.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52477127).

**Key words:** HVDC; subsequent commutation failure; renewable energy; suppression strategy

## 0 引言

我国电力能源负荷逆向分布, 基于电网换相换流器型高压直流输电系统(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)以其输送容量

大、传输距离远等优势被广泛应用于远距离、大容量输电中<sup>[1-3]</sup>。但由于 LCC-HVDC(后文简称 LCC)采用的晶闸管换流器件无法实现可控关断, 换相失败时有发生, 造成直流电流激增、传输功率损失。其中, 首次换相失败一般发生于交流故障后几至十几毫秒内, 其演化迅速, LCC 控制系统较难干涉且单次换相失败对电力系统影响有限, 而后续换相失败一般发生于故障清除阶段, 其演化过程更长, 控

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目资助(52477127); 江苏省自然科学基金项目资助(BK20221197)

制系统充分参与调节,且短期内若发生多次后续换相失败甚至会导致直流闭锁,严重危害电力系统安全稳定运行<sup>[4-5]</sup>。

为此,诸多学者针对优化 LCC 控制策略以实现后续换相失败的有效抑制开展了大量研究,提出了以改进逆变侧低压限流(voltage dependent current order limiter, VDCOL)控制响应特性为核心的抑制策略<sup>[6-11]</sup>。文献[9]提出了一种基于虚拟电阻的限流控制方法,在 VDCOL 输入端引入虚拟电阻压降优化其输出的限流指令;文献[10]根据电压大小对 VDCOL 控制曲线斜率进行自适应调节,使得 VDCOL 直流电流指令调节灵敏度与故障严重程度正相关;文献[11]分析了 VDCOL 交流电压与直流电压两种输入方式对后续换相失败风险的影响机制,并提出了一种基于输入信号转换的控制策略,以实现后续换相失败的有效抑制。与此同时,除 VDCOL 外,有研究表明电流偏差控制(current error controller, CEC)的响应特性也与 LCC 后续换相失败是否发生强相关,CEC 输出的关断角增量越大,越有利于正常换相,但不利于传输功率恢复<sup>[12-16]</sup>。文献[13]考虑不同交流故障严重程度,提出了一种 CEC 斜坡函数谐波自适应调节方式;类似地,文献[16]考虑不同交流故障类型,对 CEC 输出上限进行了自适应调节;文献[17]详细分析了 LCC 从首次换相失败到恢复过程中逆变侧控制系统各环节间的交互响应特性,研究表明,逆变侧由定电流(constant current, CC)控制模式切换至定关断角(constant extinction angle, CEA)控制模式后,换相结束时刻 CEC 输出的快速下降是引发后续换相失败的直接原因。然而,上述关于后续换相失败抑制的研究场景中,尚未充分考虑光伏等新能源接入的影响。

随着“双碳”战略的推进,LCC 受端电网中新能源发电机组占比显著增加。与传统同步发电系统相比,新能源发电系统呈高谐波<sup>[18-19]</sup>、强受控<sup>[20-21]</sup>、低抗扰<sup>[22-23]</sup>特性,可能对 LCC 运行构成潜在威胁。本文针对光伏接入下 LCC 后续换相失败机理问题<sup>[24]</sup>,开展了系统性研究,并进行了深入分析,其初步结论如下:当 LCC 发生首次换相失败时会向受端电网注入一系列低次谐波,导致近区光伏出力不稳定,引起电网电压及 LCC 直流电流波动,直流电流作为 LCC 受端控制系统输入量,其量值的波动将通过控制环节传递,引发超前触发角指令的波动,最终导致后续换相失败风险增大。同时,已有文献利用光伏、储能的动态无功支撑能力抑制直流连续换相失败<sup>[25-26]</sup>。但其本质在于通过在故障期间向受端换流母线补充无功功率以提升电压水平,策略未

结合新能源接入对 LCC 后续换相失败的影响机理,且不同工况下的适用性有待验证,亟需研究具有针对性的后续换相失败抑制策略。

为此,本文以光伏发电系统接入 LCC 受端电网为研究场景,简述了光伏接入诱发 LCC 后续换相失败的过程及机理,并基于此提出了一种针对性的后续换相失败抑制策略,该策略可消除 LCC 首次换相失败恢复后因光伏出力不稳定带来的 LCC 逆变侧超前触发角指令波动现象,由此实现后续换相失败抑制。最后结合 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建了系统模型及抑制策略,在不同光伏并网场景下验证了所提后续换相失败抑制策略的有效性。

## 1 光伏接入下 LCC 后续换相失败诱发机理

已有研究表明,光伏发电系统接入 LCC 受端交流电网后,将显著增加 LCC 后续换相失败的风险<sup>[24]</sup>。其诱发机理可概括为:LCC 发生首次换相失败后向电网注入一系列低次正负序谐波,导致光伏输出功率不稳定及电压波动,该影响进一步反馈至 LCC,导致 LCC 逆变侧控制系统生成的触发角指令波动,最终引发后续换相失败。详细的理论推导及仿真验证过程见文献[24],本文不再赘述,下面就该机理进行分阶段简要介绍。

### 1.1 LCC 首次换相失败后输出谐波电流特性

换相失败发生后,LCC 直流电流激增导致换流变压器出现直流偏磁现象,变压器阀侧电压出现 100、150 Hz 谐波分量;同时,换相失败导致换流阀多个桥臂同时导通,从而为交流电流流入直流回路提供了通路,直流电流中出现 50 Hz 工频分量及 100、150 Hz 谐波分量。此外,根据开关函数理论,直流侧  $m$  次交流电流将在交流侧产生  $m+1$  次正序电流及  $m-1$  次负序电流。因此,LCC 直流电流中因换相失败产生的 50、100 及 150 Hz 谐波分量,经换流器调制并通过换流变压器传递后,将向电网侧注入以下谐波分量:

1) 因换流器调制产生的 50、100 Hz 负序分量、100、150、200 Hz 正序分量及直流分量;

2) 换流器调制产生的直流分量侵入换流变,因换流变发生直流偏磁产生的 100 Hz 正序分量。

上述谐波分量的注入将使得受端交流电网、光伏并网点处的谐波水平升高,引发一系列连锁反应。

### 1.2 LCC 谐波电流注入后光伏输出功率特性

LCC 在换相失败后向电网注入的正负序电流将跨电压等级传播至光伏发电系统,光伏并网点将出现同频电压、电流。在仅考虑 50、100 Hz 正负序分量的情况下,根据文献[24]的推导,光伏输出瞬

时有功、无功中,除直流分量外,还将出现 50、100、150、200 Hz 的交流分量。

同时, LCC 换相失败后直流电流的响应特性变化包括因直流短路导致的激增、LCC 控制介入后的下降及回升等,直流电流在该暂态过程中变化剧烈, LCC 谐波电流注入的幅值并不稳定,使得光伏输出功率中上述交流分量的幅值并非定值,光伏输出功率平均值出现波动。

### 1.3 光伏输出功率波动对 LCC 反馈影响

根据电力系统潮流理论,节点功率不稳定将导致节点电压幅值的波动,因此, LCC 谐波电流注入后,光伏并网点电压幅值将出现波动,该波动将经电网传递,反馈至 LCC 逆变侧换流母线,体现为 LCC 逆变侧换相电压及逆变侧直流电压的波动。

假设 LCC 逆变侧发生换相失败时整流侧直流电压不变, LCC 逆变侧直流电压的波动将导致直流电流的波动。同时,直流电流作为 LCC 逆变侧控制的输入量,由于 LCC 控制系统含大量线性控制环节,比如低压限流控制、电流偏差控制及定电流、定关断角控制中的比例环节,直流电流的波动最终会导致 LCC 逆变侧控制系统输出的超前触发角指令的波动,最后带来后续换相失败风险。

其中,超前触发角  $\beta$  与关断角  $\gamma$  之间的关系如式(1)所示。

$$\gamma = \arccos\left(\frac{2\omega L_r I_d}{U_L} + \cos \beta\right) \quad (1)$$

式中:  $L_r$  为等值换相电感;  $I_d$  为直流电流;  $U_L$  为逆变侧换流母线电压线压幅值;  $\omega$  为工频角频率。根据式(1)可知,超前触发角  $\beta$  与关断角  $\gamma$  正相关,当超前触发角  $\beta$  发生波动时,关断角  $\gamma$  也会随着波动,当关断角降至临界关断角以下时便会发生换相失败。

综上所述,光伏接入 LCC 受端交流电网后,将改变 LCC 在首次换相失败后的电网外部电气特性及 LCC 控制响应特性,具体体现为电网电压不稳定及 LCC 超前触发角指令不稳定,这是诱发 LCC 发生后续换相失败的直接原因。

## 2 基于逆变侧控制指令波动平抑的后续换相失败抑制策略

### 2.1 附加控制偏差计算

根据第 1 节分析可知,光伏接入 LCC 受端电网后,当电网发生交流故障时, LCC 易因超前触发角指令波动而发生后续换相失败,因此,本节提出了一种基于 LCC 逆变侧控制指令波动平抑的后续换

相失败抑制策略。

根据 LCC 逆变侧控制原理,控制系统主要由 CC、CEA、CEC、VDCOL 控制环节构成,具体如图 1 所示。其中 CC、CEA 控制环节采用 PI 控制原理,CEC 控制环节以带上限不带下限的线性斜坡函数作为控制曲线,VDCOL 控制环节以带上下限的线性斜坡函数作为控制曲线,控制系统最终输出的超前触发角指令为 CC、CEA 控制输出指令  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  中的最大值,其具体控制曲线见图 2、图 3。

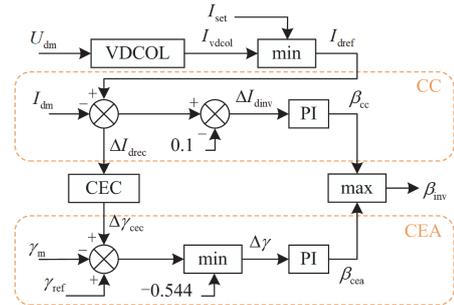


图 1 LCC-HVDC 逆变侧详细控制框图

Fig. 1 Detailed inverter-side control block diagram of LCC-HVDC

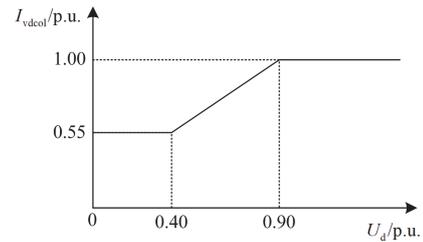


图 2 低压限流控制曲线

Fig. 2 Control curve of VDCOL

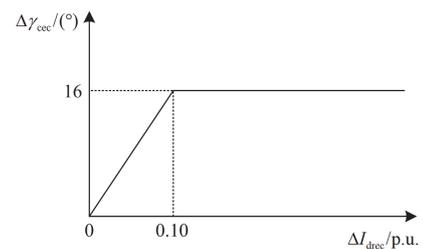


图 3 电流偏差控制曲线

Fig. 3 Control curve of CEC

由图 1—图 3 可知, LCC 逆变侧控制系统中包含比例-积分(proportional-integral, PI)控制、低压限流控制、电流偏差控制等线性控制环节,当各控制指令输出值未达限值时,系统的输入输出之间将存在明显的线性传递关系。

当各控制环节输出指令均未达到限值时,结合图 1—图 3 可将  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  表达式整理为

$$\begin{cases} \beta_{cc} = k_{p_{cc}}(I_{dref} - I_{dm} - 0.1) + k_{i_{cc}} \int (I_{dref} - I_{dm} - 0.1) dt \\ \beta_{cea} = k_{p_{cea}}(\gamma_{ref} + \Delta\gamma_{cec} - \gamma_m) + k_{i_{cea}} \int (\gamma_{ref} + \Delta\gamma_{cec} - \gamma_m) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $k_{p_{cc}}$ 、 $k_{i_{cc}}$ 、 $k_{p_{cea}}$ 、 $k_{i_{cea}}$  分别为 CC、CEA 控制 PI 环节的比例、积分增益;  $\Delta\gamma_{cec}$  为电流偏差控制输出值;  $I_{dm}$  为直流电流测量值;  $\gamma_m$  为关断角测量值;  $\gamma_{ref}$  为关断角参考值, 取值 0.2618 rad;  $I_{dref}$  为直流电流参考值, 取主控制极指令值  $I_{set}$ 、低压限流控制指令  $I_{vdcoll}$  中的最小值。主控制极指令值  $I_{set}$  一般取 1.0, 结合图 2 可知 VDCOL 输出  $I_{vdcoll}$  的上限也为 1.0, 故可认为  $I_{dref} = I_{vdcoll}$ 。

结合图 2、图 3,  $I_{vdcoll}$ 、 $\Delta\gamma_{cec}$  的表达式为

$$I_{vdcoll} = \begin{cases} 0.55 & 0 < U_{dm} < 0.4 \\ 0.9U_{dm} + 0.19 & 0.4 \leq U_{dm} \leq 0.9 \\ 1.0 & U_{dm} > 0.9 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta\gamma_{cec} = \begin{cases} k_{cec}(I_{vdcoll} - I_{dm}) & 0 < \Delta I_{drec} < 0.1 \\ 0.2793 & \Delta I_{drec} \geq 0.1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $k_{cec}$  为 CEC 控制曲线斜率;  $\Delta I_{drec}$  为 CEC 控制输入值;  $U_{dm}$  为直流电压测量值。

一般认为, LCC 首次换相失败恢复时, 交流故障已经清除<sup>[13-14]</sup>, 直流电压可以快速恢复, 对系统发生两次换相失败的案例进行说明。基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件, 搭建了如图 4 所示的含光伏接入受端电网的 LCC-HVDC 模型, 模型一次参数见表 1。该故障案例中故障位置为 110 kV 交流母线、故障电感为 0.10 H、故障类型为三相接地故障, 送变侧关断角、直流电压及两次换相失败期间的直流电压波形如图 5—图 7 所示。

由图 5、图 6 可知, 直流电压在首次换相失败恢复后迅速升高, 将直流电压波形放大后, 由图 7 可知, 直流电压在两次换相失败期间均大于 0.9 p.u.。

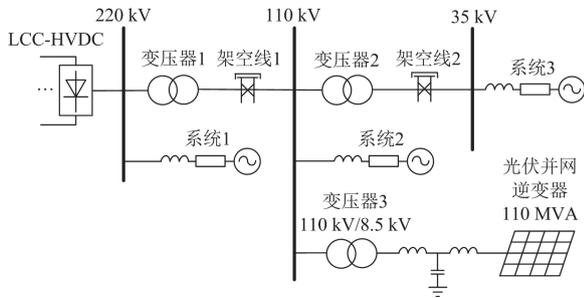


图 4 系统结构示意图

Fig. 4 System structure diagram

表 1 模型一次参数设置

Table 1 Model's primary parameter setting

系统分类	参数选取
LCC-HVDC	采用 CIGRE 直流输电系统标准测试模型
变压器 1	变比 220 kV/110 kV, 容量 1130 MVA, 漏抗 0.0915 p.u., 联结组别 YNyn0
变压器 2	变比 110 kV/35 kV, 容量 600 MVA, 漏抗 0.0972 p.u., 联结组别 YNyn0
变压器 3	变比 110 kV/8.5 kV, 容量 300 MVA, 漏抗 0.002 p.u., 联结组别 Yd11
架空线 1	型号 LGJ-400, 单位长度电阻 0.08 Ω/km, 单位长度电感 1.187 mH/km, 单位对地电容 0.009 39 μF/km, 长度 25 km
架空线 2	型号 LGJ-240, 单位长度电阻 0.132 Ω/km, 单位长度电感 1.127 mH/km, 单位对地电容 0.010 32 μF/km, 长度 20 km
220 kV 系统	等值电感 14.13 mH, 等值电阻 1.65 Ω
110 kV 系统	等值电感 247.2 mH, 等值电阻 0.61 Ω
35 kV 系统	等值电感 50.40 mH, 等值电阻 0.001 Ω
受端交流系统	2.01
短路比	
LCL 型滤波器	网侧电感 275 μH, 阀侧电感 550 μH, 对地电容 500 μF
光伏逆变器	额定容量 110 MVA, 采用 SPWM 调制, 载波频率为 850 Hz, 交流侧额定线电压有效值为 8.20 kV, 电流内环控制比例增益 1.64、积分增益 20

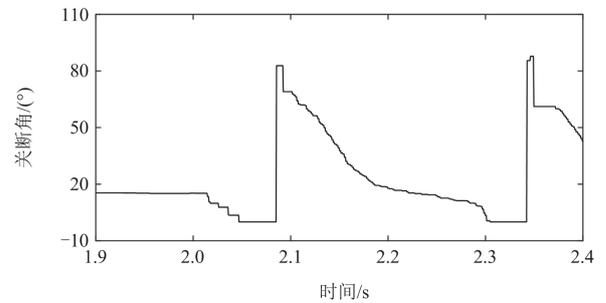


图 5 关断角

Fig. 5 Extinction angle

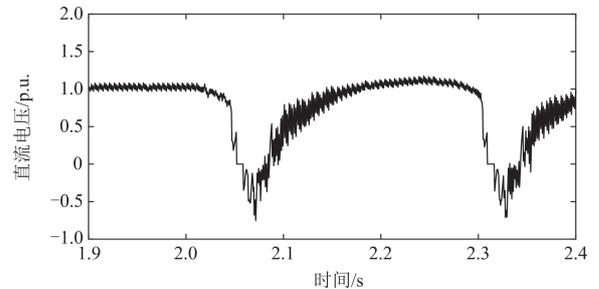


图 6 直流电压

Fig. 6 DC voltage

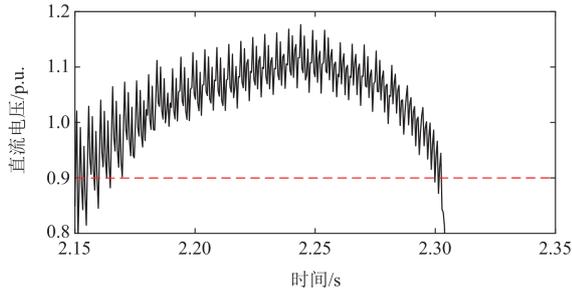


图7 两次换相失败期间直流电压

Fig. 7 DC voltage between two commutation failures

因此, 假设此时  $U_{dm}$  大于 0.9 p.u., 由式(3)可知  $I_{vdc} = 1.0$  p.u.; 同时  $\Delta I_{drec}$  介于 0~0.1 之间, 则式(2)可进一步化简为

$$\begin{cases} \beta_{cc} = k_{p_{cc}}(0.9 - I_{dm}) + k_{i_{cc}} \int (0.9 - I_{dm}) dt \\ \beta_{cea} = k_{p_{cea}} [k_{cec}(1 - I_{dm}) - \gamma_m + 0.2618] + \\ k_{i_{cea}} \int (k_{cec}(1 - I_{dm}) - \gamma_m + 0.2618) dt \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 由于  $k_{p_{cc}}$ 、 $k_{p_{cea}}$  的存在,  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  与  $I_{dm}$  存在明显的线性关系, 故当  $I_{dm}$  发生波动时,  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  也会随之波动, 且波动幅值与  $I_{dm}$  的波动幅值、CC、CEA、CEC 控制参数有关。从控制优化的层面出发, 为了避免  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  的波动, 可以选择降低 CC、CEA 控制环节的比例系数  $k_{p_{cc}}$ 、 $k_{p_{cea}}$ , 或者 CEC 控制曲线斜率  $k_{cec}$ , 但降低后会导致 LCC 首次换相失败恢复速度减慢以及 LCC 交流母线电压的恢复速度减慢等<sup>[13]</sup>。因此, 下面提出一种新的抑制波动的方法。

假设  $I_{dm}$  的平均值为  $I_{dm\_ave}$ , 波动量为  $\Delta I_{dm}$ , 则有

$$\Delta I_{dm} = I_{dm} - I_{dm\_ave} \quad (6)$$

根据式(6), 由  $\Delta I_{dm}$  引起的 CC、CEA 输出指令  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  的波动量大小  $\Delta\beta_{cc\_1}$ 、 $\Delta\beta_{cea\_1}$  可表示为

$$\begin{cases} \Delta\beta_{cc\_1} = -k_{p_{cc}} \Delta I_{dm} - k_{i_{cc}} \int \Delta I_{dm} dt \\ \Delta\beta_{cea\_1} = -k_{p_{cea}} k_{cec} \Delta I_{dm} - k_{i_{cea}} k_{cec} \int \Delta I_{dm} dt \end{cases} \quad (7)$$

可见,  $\Delta I_{dm}$  与  $\Delta\beta_{cc\_1}$ 、 $\Delta\beta_{cea\_1}$  均负相关。当  $\Delta I_{dm} > 0$  即  $I_{dm}$  出现波谷时,  $\Delta\beta_{cc\_1}$ 、 $\Delta\beta_{cea\_1} < 0$ , 此时  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  出现波峰; 当  $\Delta I_{dm} < 0$  即  $I_{dm}$  出现波峰时,  $\Delta\beta_{cc\_1}$ 、 $\Delta\beta_{cea\_1} > 0$ , 此时  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  出现波谷, LCC 后续换相失败风险增加。

下面分别在 CC、CEA 控制 PI 环节的输入端额外附加一个直流电流偏差值  $\Delta I_{extra}$  和一个关断角偏

差值  $\Delta\gamma_{extra}$ 。假设偏差投入时刻为  $t_0$ , 任意时刻  $t$  由  $\Delta I_{extra}$ 、 $\Delta\gamma_{extra}$  引起的 CC、CEA 输出指令  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  的波动量为  $\Delta\beta_{cc\_2}$ 、 $\Delta\beta_{cea\_2}$ , 则  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  的总波动量  $\Delta\beta_{cc}$ 、 $\Delta\beta_{cea}$  分别为

$$\begin{cases} \Delta\beta_{cc} = \Delta\beta_{cc\_1} + \Delta\beta_{cc\_2} = k_{p_{cc}}(\Delta I_{extra} - \Delta I_{dm}) + \\ k_{i_{cc}} \int_{t_0}^t (\Delta I_{extra} - \Delta I_{dm}) dt \\ \Delta\beta_{cea} = \Delta\beta_{cea\_1} + \Delta\beta_{cea\_2} = k_{p_{cea}}(\Delta\gamma_{extra} - k_{cec} \Delta I_{dm}) + \\ k_{i_{cea}} \int_{t_0}^t (\Delta\gamma_{extra} - k_{cec} \Delta I_{dm}) dt \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8), 为确保  $t_0$  时刻后  $\Delta\beta_{cc}$ 、 $\Delta\beta_{cea}$  均为 0, 则  $\Delta I_{extra}$ 、 $\Delta\gamma_{extra}$  应满足:

$$\begin{cases} \Delta I_{extra} = \Delta I_{dm} \\ \Delta\gamma_{extra} = k_{cec} \cdot \Delta I_{dm} \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 抑制策略设计

策略原理为在 LCC 逆变侧控制系统中 CC、CEA 控制的输入端分别加入一个直流电流偏差值  $\Delta I_{extra}$  和一个关断角偏差值  $\Delta\gamma_{extra}$ , 用于中和因  $I_{dm}$  导致的 CC、CEA 控制输出量中  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  的波动, 以下进行抑制策略的原理设计。

根据平均值定义,  $I_{dm}$  的平均值  $I_{dm\_ave}$  为

$$I_{dm\_ave} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t I_{dm} dt \quad (10)$$

式中:  $T$  为平均值计算周期, 取 0.02 s。以 CIGRE 直流输电系统标准测试模型为例, 其 CEC 控制曲线斜率  $k_{cec} = 2.793$ , 故  $\Delta I_{extra}$ 、 $\Delta\gamma_{extra}$  具体取值为

$$\begin{cases} \Delta I_{extra} = \Delta I_{dm} \\ \Delta\gamma_{extra} = 2.793 \Delta I_{dm} \end{cases} \quad (11)$$

此外, 策略应在 LCC 首次换相失败后的恢复阶段启动, 一方面此时 LCC 已恢复正常换相,  $\gamma_m > \gamma_{min}$  时应当投入策略; 另一方面 LCC 在此期间会优先恢复直流电流,  $\beta_{cc}$  升高 CC 控制生效, 而正常运行时  $\beta_{cc} \approx 0.4676$  rad, 故假设  $\beta_{cc}$  大于 0.5234 rad 时投入策略。抑制策略控制框图如图 8 所示。

## 3 仿真验证

### 3.1 模型拓扑及仿真案例

基于图 4 所示系统对所提策略的后续换相失败抑制效果进行仿真验证。在光伏并网点设置三相接地故障, 故障电感值为 0.10 H, 持续时间 0.10 s, 考虑不同光伏、LCC 间电气距离。



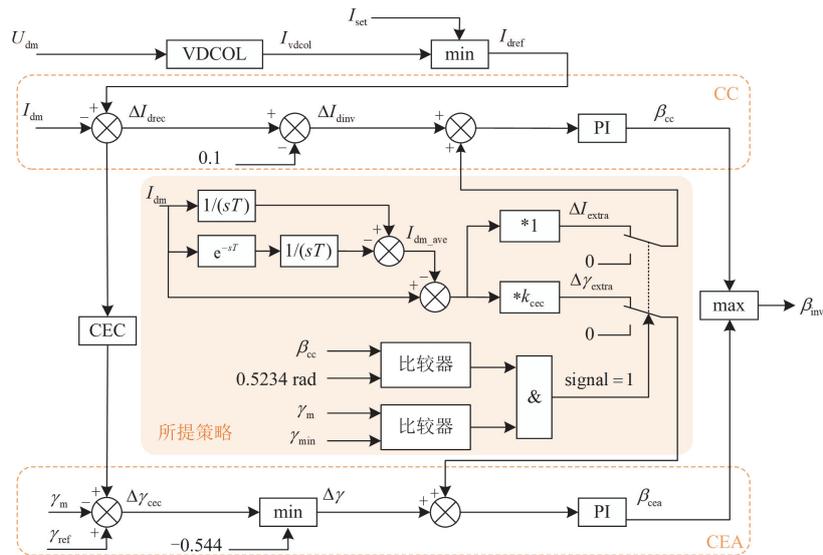
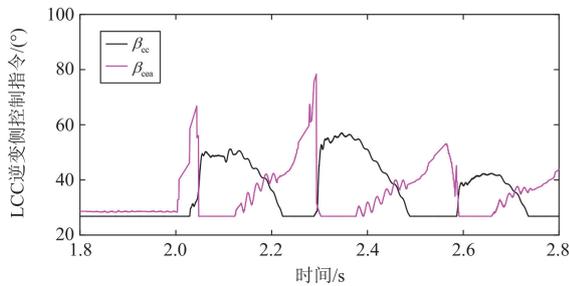


图 8 抑制策略控制框图

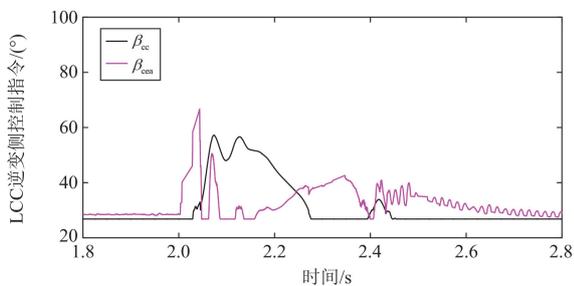
Fig. 8 Control block diagram of suppression strategy

设置光伏与 LCC 之间 110 kV 联络线长度为 25 km，对比策略投入前后 LCC 逆变侧控制指令及关断角变化，相关波形如图 9、图 10 所示。

由图 9、图 10 可知，在 LCC 首次换相失败恢复至第二次换相失败发生期间，即 2.05~2.25 s 时段内，投入所提策略后，LCC 逆变侧控制指令  $\beta_{cc}$ 、 $\beta_{cea}$  曲线基本平稳，无波动现象，LCC 未发生后续换相



(a) 策略投入前



(b) 策略投入后

图 9 线路长度 25 km 下策略投入前后 LCC 控制指令对比

Fig. 9 Comparison of LCC control instructions with and without strategy when the line length is 25 km

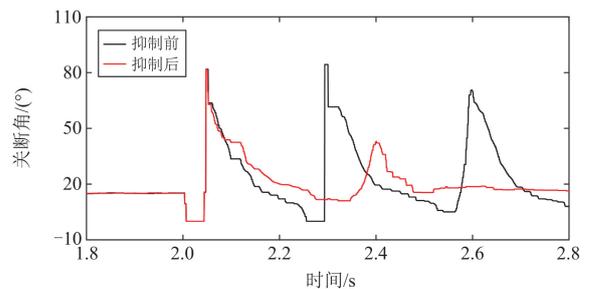


图 10 线路长度 25 km 下策略投入前后 LCC 关断角对比  
Fig. 10 Comparison of LCC extinction angle with and without strategy when the line length is 25 km

失败。当光伏、LCC 之间 110 kV 联络线的长度为 50、100 km 时相关波形如图 11—图 14 所示，策略投入后 LCC 未发生后续换相失败。

### 3.2 不同光伏并网场景下策略抑制效果验证

为进一步验证在多种故障情况下所提策略的效果，考虑 3 种控制策略：策略 1 为系统原控制策略；策略 2 为文献[26]所提策略；策略 3 为本文所提策略。在不同故障类型、不同光伏装机容量、光伏接入距离、故障位置等光伏并网场景下测试策略投入前后 LCC 的换相失败次数，如表 2—表 7 所示。

由表 2—表 7 可知，在投入所提后续换相失败抑制策略后，在不同光伏装机容量、不同光伏接入电气距离、不同故障位置下，LCC 基本都不再发生后续换相失败，与现有抑制策略相比，后续换相失败次数也更少，证明所提策略能有效提升高压直流输电系统在光伏接入受端电网条件下的后续换相失败抵御能力。





表 6 单相接地故障时不同光伏接入距离下不同策略投入前后 LCC 换相失败次数统计

Table 6 Statistics of LCC commutation failures before and after putting in different strategies in different PV access distances when a single-phase ground fault occurs

线路长度/km		故障电感/H													
		0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
25	策略 1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	策略 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	策略 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
50	策略 1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	策略 2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2
	策略 3	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2
100	策略 1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	1	0	0	0
	策略 2	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	0	0	0
	策略 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

表 7 单相接地故障时不同故障位置下不同策略投入前后 LCC 换相失败次数统计

Table 7 Statistics of LCC commutation failures before and after putting in different strategies in different fault locations when a single-phase ground fault occurs

故障位置		故障电感/H													
		0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
线路起点	策略 1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	策略 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2
	策略 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
线路中点	策略 1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	策略 2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1
	策略 3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2
线路终点	策略 1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	策略 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	策略 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1

### 4 结论

本文分析了光伏接入对 LCC 后续换相失败的诱发机理，提出了一种基于逆变侧控制指令波动平抑的后续换相失败抑制策略，得出以下结论。

1) LCC 首次换相失败后光伏输出功率不稳定将导致 LCC 直流电流波动，并通过 LCC 控制系统的线性传递，导致超前触发角指令产生波动，这是光伏接入诱发 LCC 后续换相失败的直接原因。

2) 本文所提的后续换相失败抑制策略有助于 LCC 逆变侧控制系统输出稳定的超前触发角指令，同时在不同光伏并网场景下均具备良好的后续换相失败抑制效果。

### 参考文献

[1] 王羽丰, 李凤婷, 尹纯亚. 换相失败期间送端系统暂态有功建模及其支撑策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 177-187.

WANG Yufeng, LI Fengting, YIN Chunya. Transient active power modeling of a sending system and its support strategy during commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 177-187.

[2] 张帆, 高凯, 杨岳峰, 等. 具备有载调压功能的 LCC-HVDC 拓扑及控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 1-10.

ZHANG Fan, GAO Kai, YANG Yuefeng, et al. LCC-HVDC topology with on-load voltage regulation function and its control strategy[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 1-10.

[3] 李娟, 朱龙臻, 俎立峰, 等. 一种抑制后续换相失败的电流偏差控制参数整定方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 235-244.

LI Juan, ZHU Longzhen, ZU Lifeng, et al. A current deviation control parameter tuning method to suppress subsequent commutation failure[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 235-244.

- [4] 张雨乐, 尹纯亚, 李凤婷, 等. 考虑多馈入系统无功电压特性的同时换相失败评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 170-187.  
ZHANG Yule, YIN Chunya, LI Fengting, et al. A simultaneous commutation failure assessment method considering reactive power and voltage characteristics in multi-infeed HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 170-187.
- [5] 李凤婷, 刘雨姗, 解超, 等. 考虑换相失败影响的交流线路单相故障性质判据[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 82-90.  
LI Fengting, LIU Yushan, XIE Chao, et al. Criterion of single-phase fault nature of AC line considering the influence of commutation failure[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 82-90.
- [6] 史映萍, 尹纯亚, 李凤婷, 等. 送端交流系统故障引发逆变侧换相失败机理分析及抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 54-63.  
SHI Yingping, YIN Chunya, LI Fengting, et al. Mechanism analysis and prevention strategy of inverter side commutation failure caused by the sending end AC system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 54-63.
- [7] 王立舒, 刘勃, 乔帅翔, 等. 改变获取补偿电压方法的精确变斜率 VDCOL 设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2740-2750.  
WANG Lishu, LIU Bo, QIAO Shuaxiang, et al. Design of precise variable slope VDCOL for changing the method of obtaining compensation voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2740-2750.
- [8] 刘磊, 林圣, 何正友. 基于虚拟换相面积缺乏量的 HVDC 系统连续换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5361-5368.  
LIU Lei, LIN Sheng, HE Zhengyou. A novel method based on virtual commutation area insufficient to mitigate the continuous commutation failure for HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5361-5368.
- [9] 郭春义, 李春华, 刘羽超, 等. 一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4930-4937.  
GUO Chunyi, LI Chunhua, LIU Yuchao, et al. A DC current limitation control method based on virtual-resistance to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4930-4937.
- [10] 孟庆强, 刘泽洪, 洪乐荣, 等. 一种抑制连续换相失败的非线性 VDCOL 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 119-127.  
MENG Qingqiang, LIU Zehong, HONG Lerong, et al. A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 119-127.
- [11] 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.
- [12] 朱龙臻, 牛犛, 王志冰, 等. 一种抑制连续换相失败的关断角动态补偿控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7621-7631.  
ZHU Longzhen, NIU Chong, WANG Zhibing, et al. An extinction angle dynamic compensation control method for suppressing continuous commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7621-7631.
- [13] 周泓宇, 姚伟, 李佳, 等. 基于电流电压预测的直流输电换相失败预防策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5948-5959.  
ZHOU Hongyu, YAO Wei, LI Jia, et al. Commutation failure prevention strategy of HVDC based on current and voltage prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5948-5959.
- [14] 李新年, 李涛, 刘耀, 等. 华东多直流馈入系统换相失败仿真研究[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 77-83.  
LI Xinnian, LI Tao, LIU Yao, et al. Simulation research on multi-infeed HVDC commutation failure in east China power grid[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 77-83.
- [15] 夏海涛, 周小平, 洪乐荣, 等. 一种抑制后续换相失败的自适应电流偏差控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4345-4356.  
XIA Haitao, ZHOU Xiaoping, HONG Lerong, et al. An adaptive current deviation control method for suppressing following commutation failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4345-4356.
- [16] 戴志辉, 潘星宇, 王靖宇. 基于动态电流偏差控制的连续换相失败抑制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 49-58.  
DAI Zhihui, PAN Xingyu, WANG Jingyu. Continuous commutation failure suppression method based on dynamic current deviation control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 49-58.
- [17] 刘磊, 林圣, 刘健, 等. 控制器交互不当引发后续换相失败的机理分析[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3562-3568.

- LIU Lei, LIN Sheng, LIU Jian, et al. Mechanism analysis of subsequent commutation failures caused by improper interaction of controllers[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3562-3568.
- [18] 谢宁, 罗安, 陈燕东, 等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 10-17.
- XIE Ning, LUO An, CHEN Yandong, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-17.
- [19] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16.
- XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16.
- [20] 姜卫东, 吴志清, 李王敏, 等. 电网不对称时抑制负序电流并网逆变器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 77-84.
- JIANG Weidong, WU Zhiqing, LI Wangmin, et al. Control strategy of suppressing negative sequence current of grid-connected inverter base on asymmetric grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 77-84.
- [21] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变器分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
- KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [22] 杜潇, 周林, 郭珂, 等. 大型光伏电站静态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3427-3434.
- DU Xiao, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Static voltage stability analysis of large-scale photovoltaic plants[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3427-3434.
- [23] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4043-4051.
- TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—part II: factors affecting transient angle stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043-4051.
- [24] 钟文梁, 刘健, 林圣, 等. 光伏接入直流受端电网下直流换相失败影响机理初探[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 3043-3052.
- ZHONG Wenliang, LIU Jian, LIN Sheng, et al. A preliminary study on the influence mechanism of DC commutation failure considering photovoltaic access in terminal power grid[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 3043-3052.
- [25] 刘世超, 王银照, 郑施, 等. 抑制直流连续换相失败的光伏无功补偿策略[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 101-107.
- LIU Shichao, WANG Yinzhao, ZHENG Shi, et al. Photovoltaic reactive power compensation strategy for suppressing DC continuous commutation failure[J]. Computer Simulation, 2022, 39(9): 101-107.
- [26] 尹寒航, 周小平, 陈燕东, 等. 计及电网侧储能交互作用的MIDC后续换相失败机理分析及抑制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2820-2832.
- YIN Hanhang, ZHOU Xiaoping, CHEN Yandong, et al. Subsequent commutation failure mechanism analysis and prevention of MIDC system considering interaction of grid side energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2820-2832.

收稿日期: 2024-07-28; 修回日期: 2025-02-17

作者简介:

赵静波(1982—), 男, 正高级工程师, 研究方向为电力系统稳定和控制、新能源并网运行; E-mail: zhaojingbo\_sgcc@163.com

钟文梁(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为换相失败分析与抑制; E-mail: 1099356993@qq.com

安海云(1981—), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定和控制。E-mail: haiyun\_229@163.com

(编辑 许威)