

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250410

基于功率灵敏度分析的嵌入式 VSC-HVDC 过载紧急控制方法

朱介北, 李丰地, 陈彬彬, 俞露杰, 李斌

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 高比例、强随机性的可再生能源接入电网常导致交流传输线路过载, 同时电力系统升级改造中构建的嵌入式柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)系统的可控性没有得到充分利用。为此提出了一种基于功率灵敏度的嵌入式 VSC-HVDC 紧急控制方法, 以快速缓解传输线路过载问题。首先, 利用系统模型建立包含嵌入式 VSC-HVDC 的交流-直流功率灵敏度矩阵。然后, 在实时运行中根据推导的灵敏度矩阵调整 VSC-HVDC 的有功功率, 以应对特定的交流电网过载。在调整过程中, 采用优化控制方法确保直流调整的总量最小化, 同时交流线路有功功率保持在可接受的范围内。最后, 通过修改的 IEEE39 节点系统仿真验证了该方法在多种故障工况下的有效性, 可快速缓解交流线路过载并保证全网运行安全。

关键词: 线路过负荷; 功率灵敏度; 紧急控制; 嵌入式直流输电; 柔性直流输电

Power sensitivity analysis-based embedded VSC-HVDC overload emergency control

ZHU Jiebei, LI Fengdi, CHEN Binbin, YU Lujie, LI Bin

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The large-scale integration of renewable energy sources with high penetration levels and strong randomness often leads to overloading of AC transmission lines. Meanwhile, in power system upgrading and construction, the controllability of the embedded voltage source converter-based high voltage direct current (VSC-HVDC) systems has not been fully exploited. To address this issue, this paper proposes a power sensitivity analysis-based embedded VSC-HVDC emergency control (SEC) to mitigate transmission overloading. First, an AC-DC power sensitivity matrix incorporating embedded VSC-HVDC is established based on the system model. Then, during real-time operation, the active power of the VSC-HVDC is adjusted to address specific AC grid overloading according to the derived sensitivity matrix. During the adjustment process, an optimization-based control method is used to minimize the total variation in DC adjustment while keeping the active power of AC transmission lines within acceptable limits. Finally, simulation verification is carried out using a modified IEEE benchmark 39-bus system, demonstrating that the proposed SEC can address AC grid overloading under various grid fault scenarios and ensure the safe operation of the entire network.

This work is supported by the Joint Project of National Natural Science Foundation of China (No. U23B20123).

Key words: line overload; power sensitivity; emergency control; embedded HVDC; VSC-HVDC

0 引言

随着“双碳”目标的推进, 我国大规模新能源并网加剧了源荷时空不平衡、不匹配问题, 尤其在“三北”地区弃风弃光率长期高于 5%^[1-3]。柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)凭借其大容量远距离输电及灵

活有功无功调控能力, 成为解决新能源消纳和电网升级的关键技术^[4-7]。然而, 随着可再生能源渗透率提高, 电网潮流不确定性增强, 交流输电线路过载风险加剧, 故障后潮流转移可能引发连锁跳闸, 甚至导致大停电事故^[8-11]。因此, 研究 VSC-HVDC 在电力系统中的过载紧急控制技术, 改变事故后的有功潮流分布以避免事故规模进一步扩大, 对提升电网安全稳定运行水平具有重要意义。

针对事故后系统潮流转移导致部分线路过载的问题, 现有的控制方法主要分为优化规划法和灵敏

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目资助(U23B20123); 智能电网国家科技重大专项资助(2025ZD0806800)

度法: 1) 优化规划法以最小调整量为目标, 通过最优潮流模型优化系统调度与资源配置, 在满足安全约束条件下寻求最优运行^[12-16]。然而, 优化规划法的优化控制不断迭代更新, 需要较长时间才能达到新的运行点, 难以满足实时性要求。2) 灵敏度法通过直接量化控制参数对线路参数的影响, 适用于快速分析算法, 满足紧急控制的需求^[17-20]。文献[21-22]将灵敏度用于控制节点的筛选与排序, 通过按确定步长调整同步机功率, 观察越限是否得到控制, 但并没有直接将灵敏度用于故障后的功率调整计算。文献[23]提出了节点-功率灵敏度的概念, 通过节点和线路之间的功率灵敏度关系直接确定了同步机组的功率调整量。然而, 传统灵敏度方法多针对交流电网设计, 没有考虑交直流耦合的问题, 且传统基于发电机调节的紧急控制响应速度较慢。

对于 HVDC 在输电线路过载紧急控制中的应用, 文献[24]通过滚动时域优化动态调整多端 VSC-HVDC 系统的功率注入应对故障后的动态过载问题, 但在线优化方法计算复杂度高, 无法满足紧急控制的实时性要求。交流系统中的支路-节点灵敏度^[23]在包含直流的电网中有一定局限性, 为此, 文献[25]研究了基于灵敏度的直流电网潮流转移计算方法, 但没有应用于缓解过载控制。文献[26]引入了基于线性灵敏度分析的补偿因子, 以量化 VSC-HVDC 系统对交流线路功率的调节效果, 但线性灵敏度依赖于实时测量数据, 这些数据可能缺失或存在错误。文献[27]提出了一种动态纠正控制方法, 利用 VSC-HVDC 缓解混合交直流电力系统中的传输过载。然而, 该方法中的灵敏度分析简化为电抗比, 这导致在功率预测应用中的精度不足。因此, 现有 VSC-HVDC 过载控制方法在 VSC-HVDC 与交流线路的功率灵敏度计算流程方面不够完善, 缺少基于功率灵敏度的控制调节方案。

在电网改造升级中, 传统电网的扩张受到输电走廊数量限制^[28]。利用交流线路转换为直流线路或预留的输电走廊构建嵌入式高压直流系统, 可以在有限的输电走廊内实现大容量输电, 大大提高了电网的可控性和灵活性^[29]。这类系统已在多个国家的电力网络中得到应用, 如英国的 Western Link、德国的 SuedLink 项目和中国的扬州-镇江直流项目^[30]。基于嵌入式 VSC-HVDC 的可控性可以进一步开发 AC/DC 交互支持交流传输, 在多个区域分配电网资源, 并在不增加成本的情况下缓解过载。然而, 嵌入式 VSC-HVDC 在过载情景下的紧急控制研究仍较为匮乏, 这导致其控制灵活性未能得到充分发挥。

针对包含直流的功率灵敏度计算精度不足、缺乏基于功率灵敏度的过载控制方法以及嵌入式 VSC-HVDC 过载控制研究匮乏的问题, 本文提出一种基于功率灵敏度的嵌入式 VSC-HVDC 过载紧急控制(power sensitivity analysis-based embedded VSC-HVDC emergency control for overloading mitigation, SEC)方法, 其主要特点如下。

1) 建立了包含嵌入式 VSC-HVDC 的交直流灵敏度矩阵, 量化了直流功率与交流功率之间的关系, 避免了优化问题中的功率测量和迭代计算, 并验证了其准确性。

2) 在多种故障场景下, SEC 方法通过灵敏度计算直接确定功率调整量并调节嵌入式 VSC-HVDC 功率对过载线路进行功率优化, 同时保证系统中所有线路保持安全运行状态。

首先, 本文基于传统灵敏度方法进行改进, 提出了嵌入式 VSC-HVDC 对交流线路的功率灵敏度计算方法和系统的功率灵敏度矩阵。在此基础上, 提出了 SEC 方案, 通过对 VSC-HVDC 功率的优化控制来缓解输电线路的故障后过载。最后, 利用修改的 IEEE39 节点系统验证所提出方法的有效性。

1 嵌入式 VSC-HVDC 接入的灵敏度分析

1.1 嵌入式 VSC-HVDC 接入后的电网拓扑

为适应我国大规模新能源接入需求, 提升电网输电走廊可控能力, 将两端换流站建设于同一交流电网内部的嵌入式 VSC-HVDC 拓扑如图 1 所示。嵌入式 VSC-HVDC 连接到两个负荷区域的母线, 以适应两侧地理上不匹配的发电需求。

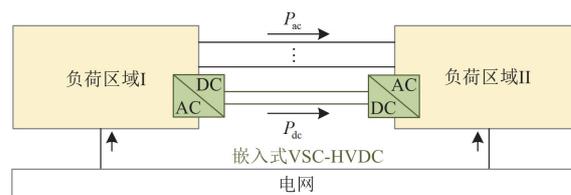


图 1 嵌入式 VSC-HVDC 接入后的电网拓扑

Fig. 1 Topology of embedded VSC-HVDC connected to power grid

在系统发生如本地发电机跳闸或交流联络线中断等紧急故障下, 嵌入式 VSC-HVDC 系统可以提供快速的潮流响应和动态电压支持, 帮助最大限度地减少干扰的影响, 降低大面积停电的风险^[31]。例如, VSC-HVDC 系统的功率流可以快速上升和下降, 以减轻其他区域交流联络线的压力或平衡系统负荷区失去外部电网大量电力供应时的电力供应和需求。

1.2 包含嵌入式 VSC-HVDC 的节点功率灵敏度

根据文献[23]交流系统节点-支路功率灵敏度的原理, 基于电力系统网络拓扑, 网络支路电流与支路电压之间的关系为

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{U}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^T \mathbf{U}_N = \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^T \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{I}_N \quad (1)$$

式中: \mathbf{I}_B 为支路电流列向量; \mathbf{U}_B 为支路电压列向量; \mathbf{Y}_B 为支路导纳矩阵; \mathbf{A} 为节点关联矩阵; \mathbf{I}_N 为节点注入电流列向量; \mathbf{Y}_N 为节点导纳矩阵。

但在嵌入式 VSC-HVDC 接入交流系统中时, 电力系统拓扑发生变化, 因此不能使用交流系统的导纳矩阵进行计算。由于本文关注的是系统处于稳定运行状态时的参数, 忽略了换流器的动态特性, 考虑直流系统中频率为 0, 电抗部分为 0, 忽略电感和电容的影响, 直流系统的导纳主要由线路的电阻决定, 即

$$y_{dc} = \frac{1}{R_{dc}} \quad (2)$$

式中: y_{dc} 为直流系统的导纳; R_{dc} 为直流线路电阻。

原来的交流节点保留其 PQ/PV 节点定义, 新增直流节点, 原来的交流导纳矩阵 \mathbf{Y}_N 在加入直流线路后扩展为

$$\mathbf{Y}_{\text{Nac-dc}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{ac} & \mathbf{Y}_{ac-dc} \\ \mathbf{Y}_{dc-ac} & \mathbf{Y}_{dc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{Y}_{\text{Nac-dc}}$ 为包含嵌入式 VSC-HVDC 的交直流系统导纳矩阵; \mathbf{Y}_{ac-dc} 为交直流系统导纳矩阵的耦合项; \mathbf{Y}_{ac} 和 \mathbf{Y}_{dc} 分别为交流系统和直流系统非耦合的导纳矩阵。

同时支路导纳矩阵 \mathbf{Y}_B 也需要将原来的交流支路导纳替换为直流支路导纳, 记作 $\mathbf{Y}_{\text{Bac-dc}}$ 。由于将交流改造成直流并没有新增系统线路, 所以节点关联矩阵 \mathbf{A} 不变, 在更新包含嵌入式 VSC-HVDC 的交直流系统导纳矩阵后, 定义网络相关系数矩阵 $\mathbf{C}(\lambda)$ 为

$$\mathbf{C}(\lambda) = \mathbf{Y}_{\text{Bac-dc}} \mathbf{A}^T \mathbf{Y}_{\text{Nac-dc}}^{-1} \quad (4)$$

根据式(1)中网络相关系数的物理意义, 可以将支路电流表示为各节点注入电流的线性组合。为了得到线路功率和节点注入功率的关系, 将两边电流同乘电压, 并展开为 $P + jQ$ 的形式, 由于线路导纳包含了电阻、电抗和电纳, 所以需要注意网络相关系数也为矢量形式。在多节点系统中可以得到

$$P_{k,B} + jQ_{k,B} = U_{k,B} (\cos \theta_{k,B} + j \sin \theta_{k,B}) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\lambda_{k-i,a} + j \lambda_{k-i,b})(P_{i,N} + jQ_{i,N})}{U_{i,N} (\cos \theta_{i,N} + j \sin \theta_{i,N})} \quad (5)$$

式中: $U_{k,B}$ 是线路 k 的起点电压有效值; $U_{i,N}$ 是节点 i 的电压有效值; $\theta_{k,B}$ 是支路 k 起始端电压的相位角(以弧度为单位); $\theta_{i,N}$ 是节点 i 电压的相位角; $P_{k,B}$ 和 $Q_{k,B}$ 分别表示支路 k 起始端的有功功率和无功功率; $P_{i,N}$ 和 $Q_{i,N}$ 分别表示节点 i 的有功功率和无功功率; λ_{k-i} 是网络相关系数矩阵 $\mathbf{C}(\lambda)$ 中支路 k 的电流与节点 i 的注入电流之间的相关参数; $\lambda_{k-i,a}$ 和 $\lambda_{k-i,b}$ 分别是 λ_{k-i} 的实部和虚部。支路和节点的电压及功率均采用其各自的标么值。

在消除传输线路有功功率过载的紧急控制中, 由于仅调整控制节点的有功功率, 而不改变其无功功率, 因此注入节点的无功功率部分设为 0。根据得到的功率计算公式的实部, 线路 k 的功率变量与节点 i 的注入功率变量之间的功率灵敏度 β_{k-i} 为

$$\beta_{k-i} = \frac{U_{k,B}}{U_{i,N}} [\lambda_{k-i,a} (\cos \theta_{k,B} \cos \theta_{i,N} + \sin \theta_{k,B} \sin \theta_{i,N}) - \lambda_{k-i,b} (\sin \theta_{k,B} \cos \theta_{i,N} - \cos \theta_{k,B} \sin \theta_{i,N})] \quad (6)$$

1.3 嵌入式 VSC-HVDC 对线路的功率灵敏度矩阵

通过包含嵌入式 VSC-HVDC 的节点灵敏度计算式(6), 可以得到系统中节点注入功率的灵敏度矩阵 $\mathbf{S}_{m \times n}$, 其中 m 表示系统中线路的数量, n 表示系统中节点的数量。其表达式为

$$\mathbf{S}_{m \times n} = \begin{bmatrix} \beta_{1-1} & \beta_{1-2} & \cdots & \beta_{1-n} \\ \beta_{2-1} & \beta_{2-2} & \cdots & \beta_{2-n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{m-1} & \beta_{m-2} & \cdots & \beta_{m-n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: 元素 β_{m-n} 为节点 n 的注入功率与线路 m 的线路功率之间的功率灵敏度。

由于嵌入式 VSC-HVDC 线路两侧的功率完全可控, 假设第 x 条直流线路连接在节点 i 和节点 j 之间, 增加直流线路功率意味着同时增加节点 i 的输出功率和节点 j 的输入功率, 因此直流线路对其他交流线路的功率灵敏度可以通过式(8)进行计算。

$$\mathbf{S}_{dc,x} = \mathbf{S}[:, j] - \mathbf{S}[:, i] \quad (8)$$

式中: $\mathbf{S}_{dc,x}$ 表示第 x 条直流线路对于系统中交流线路的功率灵敏度矩阵, 是一个包含 m 行的列向量; $\mathbf{S}[:, j]$ 和 $\mathbf{S}[:, i]$ 分别表示矩阵 $\mathbf{S}_{m \times n}$ 的第 j 列和第 i 列。

至此, 通过系统参数, 可以建立交直流系统中的嵌入式 VSC-HVDC 系统对剩余所有交流线路的功率灵敏度矩阵, 直流功率的变化可以通过功率灵敏度矩阵映射到交流功率变化上, 而不需要潮流计

算, 例如当第 x 条直流线路功率调整 $\Delta P_{dc,x}$ 后, 交流线路的功率 \mathbf{P}_p 可以通过式(9)进行计算。

$$\mathbf{P}_p = \mathbf{P}_0 + \begin{bmatrix} \Delta P_{ac,1} \\ \vdots \\ \Delta P_{ac,k} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_0 + \Delta P_{dc,x} \begin{bmatrix} S_{dc}^1 \\ \vdots \\ S_{dc}^k \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\Delta P_{ac,k}$ 为第 k 条交流线路的功率变化; \mathbf{P}_0 、 \mathbf{P}_p 分别为交流线路的初始功率值和预测功率值, 均为交流功率列向量; S_{dc}^k 为矩阵 $\mathbf{S}_{dc,x}$ 中元素, 表示第 x 条直流线路对第 k 条交流线路的功率灵敏度。

使用功率灵敏度计算线路功率时, 需要格外注意功率的方向, 各线路潮流都以节点首端到末端为正方向。若 $S_{dc}^k > 0$, 则降低直流功率可以减少交流线路沿正方向的功率; 若 $S_{dc}^k < 0$, 则增加直流功率可以减少交流线路沿正方向的功率。

2 功率越限紧急控制方案

基于嵌入式 VSC-HVDC 对线路的功率灵敏度矩阵, 直接建立了交直流功率关联特性, 相比传统基于系统模型的迭代优化方法计算耗时显著降低, 满足实时控制需求。下面利用功率灵敏度矩阵, 设计嵌入式 VSC-HVDC 对线路过载的紧急控制方法。

2.1 基于灵敏度的功率调整量优化

在系统故障发生后, 辨识系统中交流输电线路是否会发生过载。假设 k 线路过载, 过载后传输功率为 $P_{ac,k}$, 则过载量 $\Delta P_{ac,k}$ 可表示为

$$\Delta P_{ac,k} = P_{ac,k}^{\max} - P_{ac,k} \quad (10)$$

式中: $P_{ac,k}^{\max}$ 为线路的最大容量。

识别到过载线路后, 通过式(8)计算嵌入式 VSC-HVDC 对系统线路的功率灵敏度矩阵, 设参与控制的直流线路数目为 N_x , 则为了缓解线路过载功率, VSC-HVDC 的功率调整量应满足式(11)。

$$\sum_{x=1}^{N_x} S_{dc}^k \Delta P_{dc,x} \geq \Delta P_{ac,k} (1 + \varepsilon) \quad (11)$$

式中: $\Delta P_{dc,x}$ 为第 x 条直流线路的功率调整量; ε 是一个小常数, 用于表示功率变化的裕度(本文选择 5%)。

式(11)表示在第 k 条交流线路发生过载后, 根据过载功率和直流对线路的功率灵敏度, 系统中参与调节的嵌入式 VSC-HVDC 的功率调整量应该满足以上条件, 且如果同一故障后有多条线路发生过载, 则应该同时满足该计算条件。

直流功率调整后, 在缓解过载线路功率的同时, 根据灵敏度矩阵, 可以得到系统中剩余线路的功率预测值, 需要注意在直流调整过程中, 要保证非过载线路仍处于安全状态, 则功率预测值应该满足式(12)和式(13)。

$$P_{ac,m}^p = P_{ac,m} + \sum_{x=1}^{N_x} \Delta P_{dc,x} S_{dc}^m \quad (12)$$

$$-P_{ac,m}^{\max} \leq P_{ac,m}^p (1 + \varepsilon) \leq P_{ac,m}^{\max} \quad (13)$$

式中: $P_{ac,m}^p$ 、 $P_{ac,m}$ 和 $P_{ac,m}^{\max}$ 分别为第 m 条交流线路的功率预测值、实际功率和最大功率, 即线路中除过载线路外的其他线路; S_{dc}^m 为第 x 条直流线路对第 m 条交流线路的功率灵敏度; 由于预测值并不等于实际值, 仍留有一定裕度, ε 选择 5%。

由于参与调节的是连接在系统内部两端的嵌入式 VSC-HVDC, 所以不需要考虑系统功率平衡约束。本文提出的优化方案旨在最小化直流功率调整量, 并将线路过载功率优化到线路允许容量之内, 且不引起其他交流线路越限, 从而在允许过载时间内降低线路过载对系统运行的负面影响, 其优化函数为

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F &= \sum_{x=1}^{N_x} \Delta P_{dc,x} \\ \text{s.t. } &\begin{cases} \sum_{x=1}^{N_x} S_{dc}^k \Delta P_{dc,x} \geq \Delta P_{ac,k} (1 + \varepsilon) \\ -P_{ac,m}^{\max} \leq P_{ac,m}^p (1 + \varepsilon) \leq P_{ac,m}^{\max} \\ -P_{dc,x}^{\max} - P_{dc,x} \leq \Delta P_{dc,x} \leq P_{dc,x}^{\max} - P_{dc,x} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: F 为目标函数; $\Delta P_{dc,x}$ 、 $P_{dc,x}$ 、 $P_{dc,x}^{\max}$ 分别为第 x 条直流线路的功率变化量、实际功率和最大功率。

2.2 功率越限紧急控制流程

SEC 方法的流程如图 2 所示。嵌入式 VSC-HVDC 系统一端采用定功率控制, 只在单端设定参考功率, 另一端换流器通常采用定电压控制模式。因此, 换流器站间通信并非实时控制的组成部分, 其通信中断不会阻碍本地设定参考功率指令的生成和执行。同时, SEC 方法在功率优化中避免了潮流计算, 且计算速度快, 从计算到应用调整控制在秒级内, 满足了短时过载能力的要求。但是, 如果系统存在通过调整直流功率仍无法缓解的严重过载情况, 则需要考虑调整同步发电机功率或者切负荷等手段。

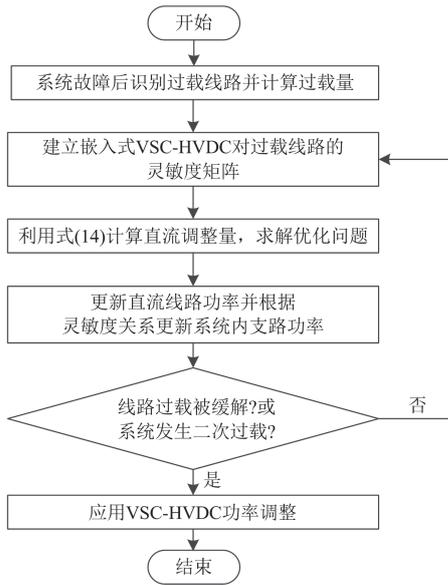


图 2 SEC 功率越限紧急控制方法流程图
Fig. 2 Flowchart of SEC scheme process

3 算例验证与分析

为了验证 SEC 方法能在多种故障场景中通过建立嵌入式 VSC-HVDC 对系统线路的功率灵敏度矩阵、计算优化问题、调整 VSC-HVDC 直流功率以最优的功率调整量解决系统线路过载问题, 本文基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建了如图 3 所示的 IEEE39 节点系统标准模型^[32], 并将交流线路 4-14、3-18、16-19 改造为嵌入式 VSC-HVDC 线路, 其额定容量为 1000 MW, 额定直流电压为 500 kV, 初始功率为原本交流线路的功率。将位于线路 L3-18 上的 VSC-HVDC 线路记作 VSC1, 位于线路 L4-14 上的 VSC-HVDC 线路记作 VSC2, 位于线路 L16-19 上的 VSC-HVDC 线路记作 VSC3。

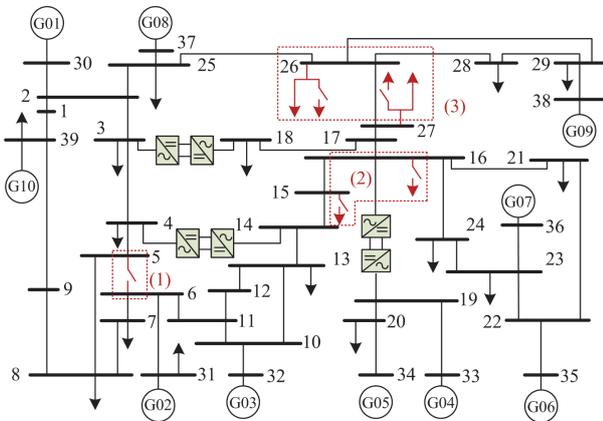


图 3 嵌入式 VSC-HVDC 接入的 39 节点系统
Fig. 3 39-bus system integrated with embedded VSC-HVDCs

3.1 功率灵敏度准确度验证

为确保本文方法的有效性, 首先要评估交直流系统中嵌入式 VSC-HVDC 对线路的功率灵敏度的准确性, 本节将所提 SEC 方法中的灵敏度计算方法与文献[23]中灵敏度计算方法(称为 CT)进行对比, 以明确效率提升比例和精度改进优势。在测试系统中, VSC2 的功率初始值为 292.6 MW, 潮流方向为节点 14 至节点 4。系统运行稳定后, 调节功率参考值使 VSC2 功率增加到 530.9 MW, 潮流方向由节点 14 向节点 4。直流线路功率改变导致系统其余交流线路功率转移, 分别使用本文所提 SEC 方法和 CT 方法计算 VSC2 对系统线路的功率灵敏度, 并将根据式(9)计算的线路功率的预测值和仿真得到的线路功率实际值进行对比, 表 1 中列举了部分线路的功率对比, 以及使用两种灵敏度方法计算的功率偏差率。由表 1 可见, 在直流功率发生改变时, 通过灵敏度法计算出的功率预测值与功率仿真结果基本一致, 部分偏差率较大可能是由作为底数的实际功率较小引起的。将偏差率求均值可得: 利用 SEC 方法计算得到的功率计算误差为 2.7%, 利用 CT 方法计算得到的功率计算误差为 9.5%, 而在 MATLAB 中统计 10 次程序运行时间, 得到 SEC 方法的平均耗时为 0.014 s, CT 方法的平均耗时为 0.017 s。综上所述, 本文所提方法相对对比方法在精度上提高了 6.8%, 且计算效率相近。

表 1 两种灵敏度方法计算对比

交流线路	功率实际值/MW	SEC 功率预测值/MW	CT 功率预测值/MW	SEC 偏差率/%	CT 偏差率/%
1-2	-121.61	-119.27	-119.94	1.9	1.4
1-39	121.42	119.65	119.77	1.5	1.4
2-3	346.97	349.34	348.89	0.7	0.6
2-25	-215.88	-215.77	-212.14	0.0	1.7
3-4	-1.38	-1.67	0.51	21.1	136.9
3-18	24.74	27.11	24.43	9.6	1.3
4-5	29.11	29.86	23.32	2.6	19.9
5-6	-301.71	-301.69	-295.21	0.0	2.2

3.2 算例分析

为了模拟在电力系统各种潜在的过载场景下 SEC 方法的有效性, 本文设置了 3 个案例进行验证。
案例 1: 设置线路 L5-6 发生断线故障。
案例 2: 设置母线 15、16 上负荷断开。
案例 3: 设置母线 26、27 上负荷增加。
输电线路的热极限运行功率限制在冬季和夏季是不同的^[33]。本文将输电线路的功率限制统一设置为 600 MW, 仿真选择在故障发生后 30 s 系统稳定

后通过控制器调整直流功率, 以更清楚地展示直流干预后的潮流变化和灵敏度计算的准确性, 便于将应用 SEC 方法前后的系统运行状态进行对比。以文献[23]所提基于功率灵敏度的线路过载划区域紧急控制策略(本文命名为 ZES) 作为基准的传统发电机调节方法, 与本文方法在过载控制响应速度、调整量两方面进行对比。

1) 案例 1 结果分析

以交流线路 L5-6 断开情景测试, 线路 L5-6 在 $t=10\text{ s}$ 发生断开故障, 导致这条线路承载的 443.8 MW 有功功率转移到其他线路上, 从而导致线路 L6-7 严重过载, 其线路上的功率达到了 809.0 MW。在线路过载后, 计算嵌入式 VSC-HVDC 线路对交流线路的灵敏度矩阵, 其中对过载和重载线路的功率灵敏度如表 2 所示。根据系统中各线路的实际功率, 利用式(14)计算得到直流线路的最佳调整功率为: $\Delta P_{dc,1} = 0\text{ MW}$ 、 $\Delta P_{dc,2} = 303.7\text{ MW}$ 、 $\Delta P_{dc,3} = 0\text{ MW}$ 。此时直流调整总变化量最小, 交流线路有功功率变化量和灵敏度计算的功率值如表 3 所示。

表 2 案例 1 直流对交流线路的功率灵敏度

Table 2 Power sensitivity of VSC-HVDC to AC lines of Case 1

交流线路	VSC1 灵敏度	VSC2 灵敏度	VSC3 灵敏度
6-7	0.4468	0.7226	-0.2815
7-8	0.4393	0.7105	-0.2669
10-13	-0.3757	-0.6207	0.2717
13-14	-0.4409	-0.7215	0.3264

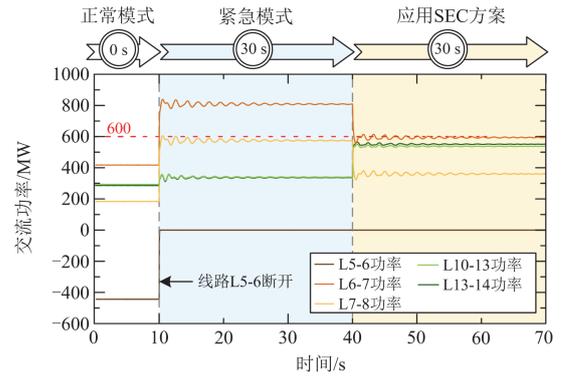
表 3 案例 1 的功率潮流数据

Table 3 Power flow data of Case 1

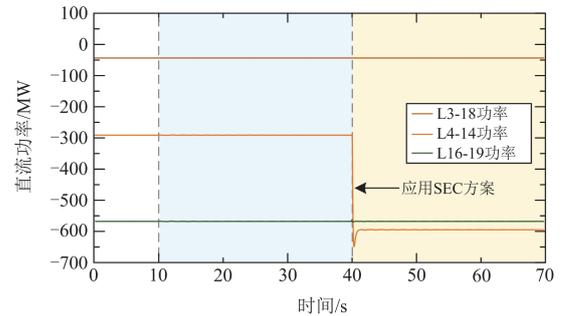
交流线路	故障后功率/ MW	调整后功率 计算值/MW	调整后功率 仿真值/MW
6-7	809.0	589.5	594.1
7-8	575.2	359.4	360.3
10-13	339.7	528.2	537.1
13-14	339.7	555.4	551.0

采用 SEC 方法进行紧急控制后, 线路 L6-7 的功率迅速从 809.0 MW 恢复到 594.1 MW, 功率在 0.25 s 内恢复到限值内, 仿真结果如图 4 所示。

通过对比实验可知, ZES 方法通过调整控制节点组 30-31, 仅需一轮调整即可缓解过载, 调整量为 92.59 MW, 从过载功率下降到规定限值的响应时间为 1.01 s; SEC 方法通过调整位于 4-14 节点间的直流功率也可以缓解过载, 调整量为 303.7 MW, 响应时间为 0.52 s。虽然 ZES 方法调整量较小, 但其调节速度较慢, 系统需要较长时间达到新的运行点, 系统振荡幅度大, 如图 5 所示。



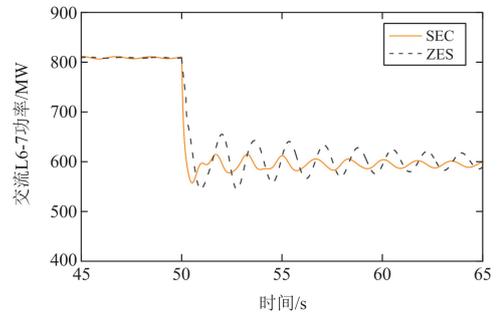
(a) 交流线路有功功率



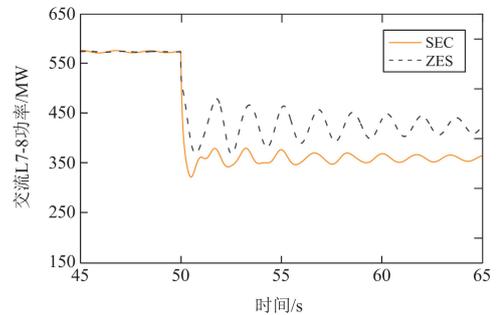
(b) 直流线路有功功率

图 4 案例 1 中采用 SEC 方法的系统响应

Fig. 4 System response using the SEC scheme in Case 1



(a) 过载线路L6-7的功率变化



(b) 重载线路L7-8的功率变化

图 5 L5-6 断路时过载控制结果对比

Fig. 5 Comparison of overload control results when L5-6 is disconnected

2) 案例 2 结果分析

以系统负载减少的场景测试，在 $t = 10\text{ s}$ 时断开连接到母线 15 和 16 的负载，导致母线 15 上的有功负载减少 320 MW，母线 16 上的有功负载减少 329 MW。负载断开后，导致线路 L5-6、L6-11、L10-11 发生过载，其过载功率分别达到了 -648.3 MW、-729.3 MW、691.8 MW。在线路过载后，计算嵌入式 VSC-HVDC 线路对交流线路的灵敏度矩阵，其中对过载和重载线路的功率灵敏度如表 4 所示。根据系统中各线路的实际功率，利用式(14)计算得到直流线路的最佳调整功率为： $\Delta P_{dc,1} = 0\text{ MW}$ 、 $\Delta P_{dc,2} = -158.9\text{ MW}$ 、 $\Delta P_{dc,3} = 0\text{ MW}$ 。交流线路有功功率变化量和灵敏度计算的功率值如表 5 所示。

表 4 案例 2 直流对交流线路的功率灵敏度

Table 4 Power sensitivity of VSC-HVDC to AC lines of Case 2

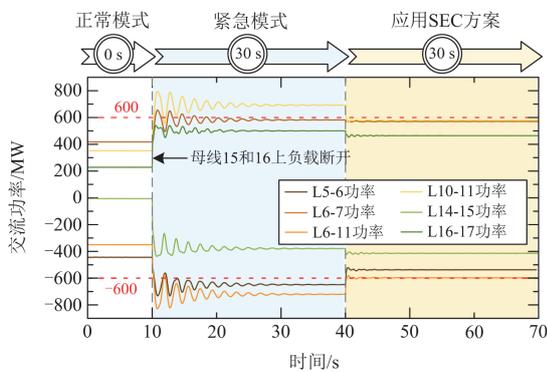
交流线路	VSC1 灵敏度	VSC2 灵敏度	VSC3 灵敏度
5-6	-0.4152	-0.7087	0.1889
6-7	0.0729	0.0845	-0.1109
6-11	-0.4900	-0.7947	0.3152
10-11	0.4104	0.6803	-0.2831

表 5 案例 2 的功率潮流数据

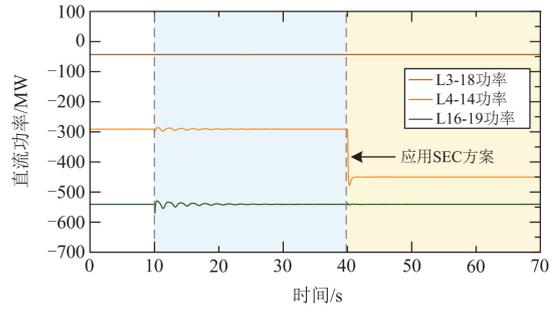
Table 5 Power flow data of Case 2

交流线路	故障后功率/ MW	调整后功率 计算值/MW	调整后功率 仿真值/MW
5-6	-648.3	-535.7	-537.4
6-7	581.7	568.3	570.1
6-11	-720.3	-593.9	-597.4
10-11	691.8	583.7	578.8

采用 SEC 方法调整功率后，线路 L6-7 的功率迅速从 -648.3 MW 恢复到 -537.4 MW，线路 L6-11 的功率从 -720.3 MW 恢复到 -597.4 MW，线路 L10-11 的功率从 691.8 MW 恢复到 578.8 MW，功率在 0.25 s 内恢复到限值内，仿真结果如图 6 所示。



(a) 交流线路有功功率

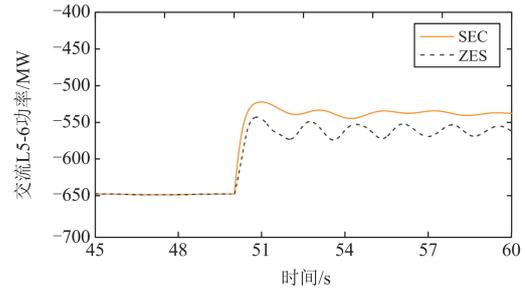


(b) 直流线路有功功率

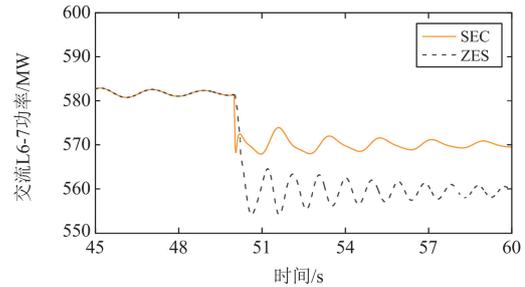
图 6 案例 2 中采用 SEC 方法的系统响应

Fig. 6 System response using the SEC scheme in Case 2

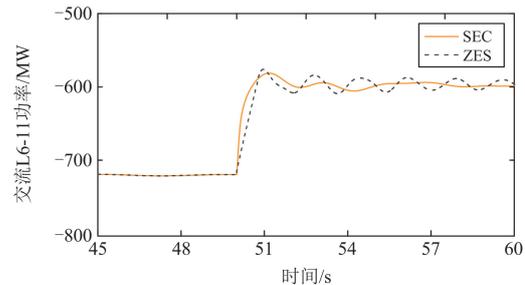
通过对比实验可知，ZES 方法通过调整控制节点组 31-32，仅需一轮调整即可缓解过载，调整量为 222.74 MW，从过载功率下降到规定限值的响应时间为 0.95 s；SEC 方法通过调整位于 4-14 节点间的直流功率也可以缓解过载，调整量为 158.9 MW，响应时间为 0.65 s。相较而言，SEC 方法调整量较小，调节速度较快，系统振荡幅度较小，如图 7 所示。



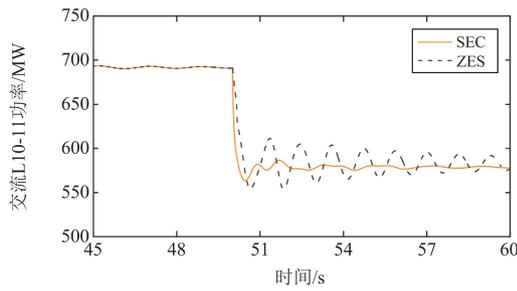
(a) 过载线路L5-6的功率变化



(b) 重载线路L6-7的功率变化



(c) 过载线路L6-11的功率变化



(d) 过载线路L10-11的功率变化

图 7 负荷断开时过载控制结果对比

Fig. 7 Comparison of overload control results when load is disconnected

3) 案例 3 结果分析

以系统负载增加的场景测试, 在 $t = 10$ s 时连接到母线 26 和 27 的负载增加, 母线 26 上的有功负载增加 500 MW, 母线 27 上的有功负载增加 350 MW, 这导致线路 L13-14 和 L25-26 发生过载, 其线路上的过载功率分别达到了 602.9 MW 和 641.7 MW。在线路过载后, 计算嵌入式 VSC-HVDC 线路对交流线路的灵敏度矩阵, 其中对过载和重载线路的功率灵敏度如表 6 所示。根据系统中各线路的实际功率, 利用式(14)计算得到直流线路的最佳调整功率为: $\Delta P_{dc,1} = 76.63$ MW、 $\Delta P_{dc,2} = 0$ MW、 $\Delta P_{dc,3} = 0$ MW。交流线路有功功率变化量和灵敏度计算的功率值如表 7 所示。

表 6 案例 3 直流对交流线路的功率灵敏度

Table 6 Power sensitivity of VSC-HVDC to AC lines of Case 3

交流线路	VSC1 灵敏度	VSC2 灵敏度	VSC3 灵敏度
10-13	-0.4107	-0.6807	0.2898
13-14	-0.4831	-0.7936	0.3478
16-17	-0.4756	0.2258	-0.4821
25-26	-0.5714	-0.2321	0.1761

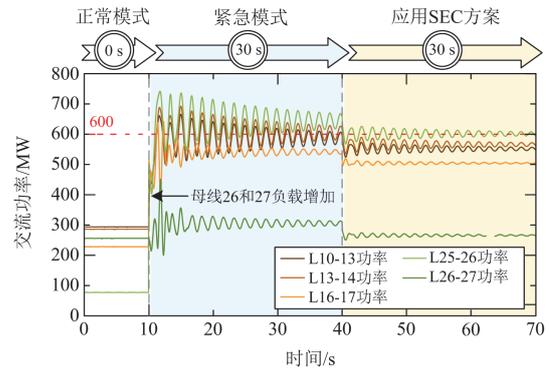
表 7 案例 3 的功率潮流数据

Table 7 Power flow data of Case 3

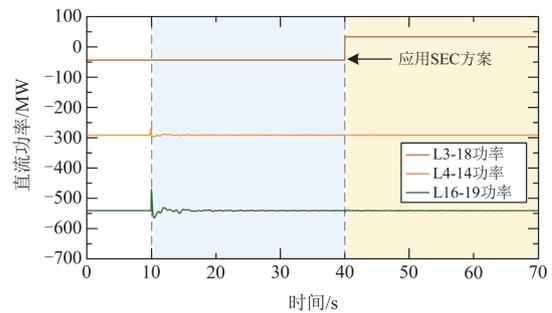
交流线路	故障后功率/ MW	调整后功率 计算值/MW	调整后功率 仿真值/MW
10-13	585.5	554.0	549.3
13-14	602.9	565.9	564.3
16-17	541.9	505.5	504.8
25-26	641.7	597.9	599.5

采用 SEC 方法调整功率后, 线路 L13-14 的功率迅速从 602.9 MW 恢复到 564.3 MW, 线路 L25-26 的功率从 641.7 MW 恢复到 599.5 MW, 线路 L10-13 的功率从 585.5 MW 变化到 549.3 MW, 如图

8 所示。



(a) 交流线路有功功率



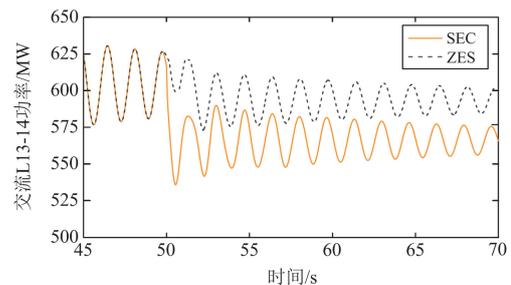
(b) 直流线路有功功率

图 8 案例 3 中采用 SEC 方法的系统响应

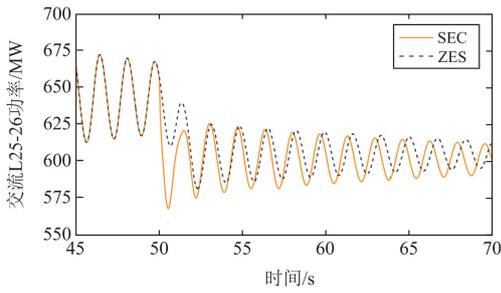
Fig. 8 System response using the SEC scheme in Case 3

通过对比实验可知, ZES 方法通过调整控制节点组 37-38, 仅需一轮调整可缓解过载, 调整量为 46.59 MW, 从过载功率下降到规定限值的响应时间为 2.23 s; SEC 方法通过调整位于 3-18 节点间的直流功率也可以缓解过载, 调整量为 76.63 MW, 响应时间为 0.55 s。虽然 ZES 方法调整量较小, 但响应速度较慢, 如图 9 所示。

综合对比实验仿真结果, SEC 方法能够缓解线路过载, 且对比 ZES 方法, 在响应速度上, SEC 方法响应速度更快, 且调整时功率振荡幅度较小; 在调整量上, 每次调整量的大小主要取决于故障发生位置与过载线路位置以及调整节点对线路灵敏度大小。



(a) 过载线路L13-14的功率变化



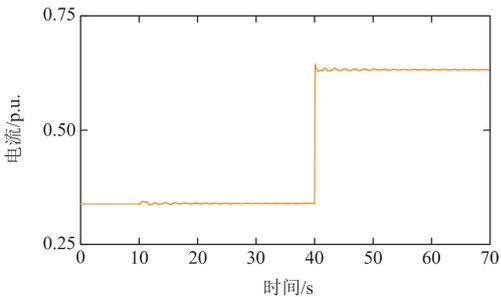
(b) 过载线路L25-26的功率变化

图 9 负荷增加时过载控制结果对比

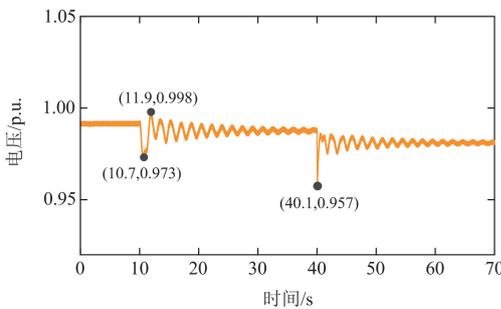
Fig. 9 Comparison of overload control results when load increases

3.3 换流器暂态应力分析

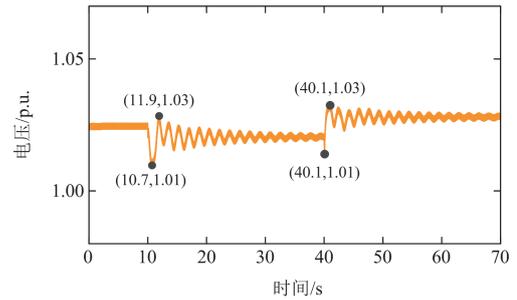
VSC-HVDC 系统中的核心设备电压源换流器由全控型电力电子器件绝缘栅双极晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)实现电能的交直流变换。在暂态电流方面,由于 IGBT 没有长时间过流能力,一般不超过 10 ms,为了防止 IGBT 会因过热而永久损坏,要求暂态电流不超过额定电流 1 p.u.。在暂态电压方面,根据 GB/T 12325—2008、GB/T 37015.1—2018 等相关标准规定,要求稳态电压偏差绝对值不超过 10%,暂态过电压不超过 1.3 p.u.。为了评估所提 SEC 控制策略应用过程中对 VSC-HVDC 换流器设备安全性的影响,对换流器暂态应力进行了分析。图 10—图 12 展示了 3 个案例场景中换流器两端的电压和直流线路上的电流。



(a) 换流器电流



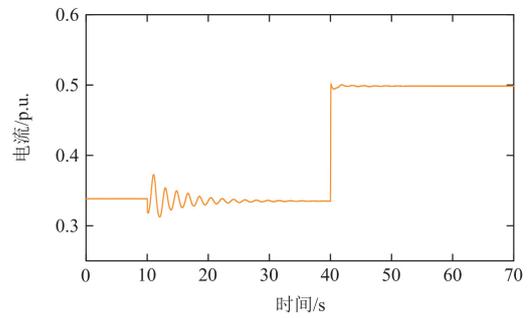
(b) 整流侧电压



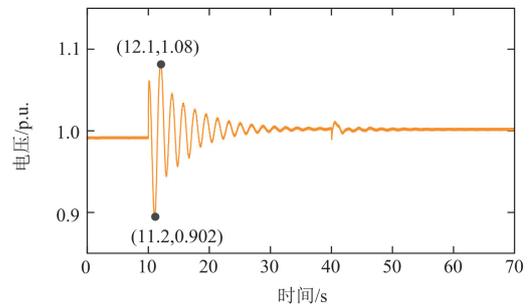
(c) 逆变侧电压

图 10 L5-6 断开时换流器两端电压和电流

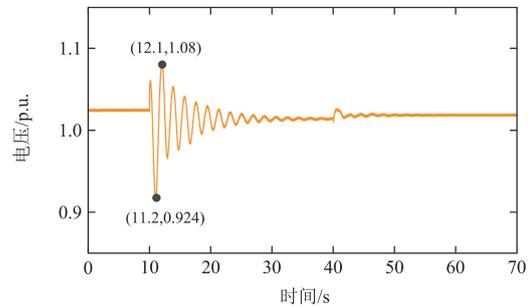
Fig. 10 Voltage and current of the converter's terminals when L5-6 is disconnected



(a) 换流器电流



(b) 整流侧电压



(c) 逆变侧电压

图 11 负荷断开时换流器两端电压和电流

Fig. 11 Voltage and current of the converter when load decreases

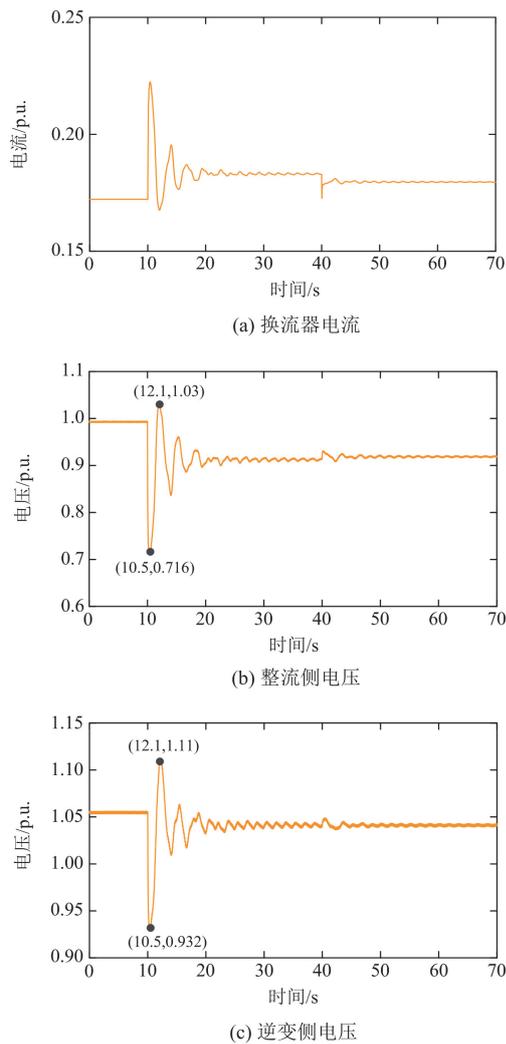


图 12 负荷增加时换流器两端电压和电流
Fig. 12 Voltage and current of the converter's terminals when load increases

综合 3 个案例场景的仿真分析, 所提控制策略在直流功率快速阶跃变化时电流会随系统运行功率变化而改变、暂态电压波动很小, 在故障发生后暂态电流电压变化较大, 但不会在暂态过程中对换流器设备安全构成风险, 紧急控制能力不会受到限制。

4 结论

为应用嵌入式 VSC-HVDC 系统对交流系统故障后线路过载进行实时紧急控制和功率优化, 本文提出了一种基于功率灵敏度的嵌入式 VSC-HVDC 过载紧急控制(power sensitivity analysis-based embedded VSC-HVDC emergency control for overloading mitigation, SEC)方法。通过构建交直流系统功率灵敏度矩阵, 实现了线路功率变化的准确预测, 基于

灵敏度设计了优化函数得到直流功率调整量, 实现了过载线路功率的快速恢复。在修改的 IEEE39 节点系统进行仿真验证, 得出如下结论。

1) SEC 方法通过扩展交直流导纳矩阵, 建立嵌入式直流对交流线路的功率灵敏度矩阵, 实现运行点变化后的快速功率预测, 其误差小于 5%。

2) SEC 方法在功率灵敏度的基础上, 通过优化模型快速求解直流功率调整量, 避免迭代潮流计算, 确保对过载线路进行快速精准的功率调整, 降低重载线路的过载风险。

3) SEC 方法在不同故障场景下, 在短时间内完成了过载功率的恢复, 为故障后过载场景中 VSC-HVDC 在紧急功率控制方面的应用提供了理论支撑。

随着远距离可再生能源发电大规模接入电力系统, 大量电能流入电网重新分配了现代电力系统中的潮流, 这个问题容易引发电网的线路过载和跳闸现象, 威胁电网的安全稳定运行。而新型电力系统升级改造中嵌入式 VSC-HVDC 的灵活性和可控性没有得到充分利用, 本文所提在系统过载后利用嵌入式 VSC-HVDC 进行实时紧急控制的方法, 为支撑交流电网功率, 提高电网运行稳定性提供有效技术方案。后续研究将进一步结合实际工程参数验证和优化该方法的性能。

参考文献

- [1] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [2] 张运洲, 胡泊. “三北”地区风电开发、输送及消纳研究[J]. 中国电力, 2012, 45(9): 1-6.
ZHANG Yunzhou, HU Bo. Study on wind power exploitation, transmission and accommodation in northern region of China[J]. Electric Power, 2012, 45(9): 1-6.
- [3] 和萍, 刘鑫, 宫智杰, 等. 高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 112-122.
HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [4] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程

- 应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.
- RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [5] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
- LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [6] DING X, LIAO S, XU J, et al. An active power support control strategy in VSC-HVDC power systems considering load characteristics of electrolytic aluminum[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(3): 1-17.
- [7] 姜惠兰, 肖瑞. 提高系统暂态稳定性的 VSC-HVDC 有功无功联合附加控制策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 138-144.
- JIANG Huilan, XIAO Rui. Combined active and reactive additional control strategy of VSC-HVDC for improving system transient stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 138-144.
- [8] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
- WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [9] 林伟芳, 易俊, 郭强, 等. 阿根廷“6.16”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2835-2842.
- LIN Fangwei, YI Jun, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in argentine power grid on June 16, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2835-2842.
- [10] 李佩杰, 玉君连, 孙志媛. 输电网拓扑优化的 MISOCP 模型及邻域搜索加速求解方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 170-177.
- LI Peijie, YU Junlian, SUN Zhiyuan. Mixed-integer second-order cone programming model for topology optimization of transmission network and accelerated solution method for neighborhood search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 170-177.
- [11] 郭挺, 杨梓晴, 徐良德, 等. 考虑新能源随机波动和 T 接线的城市电网连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 59-68.
- GUO Ting, YANG Ziqing, XU Liangde, et al. Risk assessment for cascading failures in urban power grids considering the random fluctuation of renewable energy and T-connected lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 59-68.
- [12] LI Ding, HU Ping, LIU Zhiwei. Transmission lines overload alleviation: distributed online optimization approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5): 3197-3208.
- [13] HE Qiao, DING Li, KONG Zhengmin, et al. Distributed scheme for line overload mitigation with linearized AC power flow[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(6): 2877-2881.
- [14] 任建文, 魏俊姣, 谷雨峰. 基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 53-59.
- REN Jianwen, WEI Junjiao, GU Yufeng. Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 53-59.
- [15] 臧延雪, 边晓燕, 梁思琪, 等. 计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 15-26.
- ZANG Yanxue, BIAN Xiaoyan, LIANG Siqi, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatching method of a renewable energy power system considering line transmission capacity[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 15-26.
- [16] 李天明, 王小君, 窦嘉铭, 等. 基于约束强化学习的综合能源系统优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 1-14.
- LI Tianming, WANG Xiaojun, DOU Jiaming, et al. Research on optimal dispatch of integrated energy systems based on constrained reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 1-14.
- [17] 徐正清, 肖艳炜, 李群山, 等. 基于灵敏度及粒子群算法的输电断面功率越限控制方法对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 177-186.
- XU Zhengqing, XIAO Yanwei, LI Qunshan, et al. Comparative study based on sensitivity and particle swarm optimization algorithm for power flow over-limit control method of transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 177-186.
- [18] 张博, 王聪博, 詹荣荣, 等. 计及控保协同的自适应电流差动保护方法[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 1-8.
- ZHANG Bo, WANG Congbo, ZHAN Rongrong, et al. Adaptive current differential protection method considering control and protection coordination[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 1-8.

- [19] 严晗, 徐晓春, 张毅, 等. 基于特征匹配和灵敏度辅助决策的配电网优化调控技术[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(2): 112-124.
YAN Han, XU Xiaochun, ZHANG Yi, et al. Optimization and control technology of a distribution network based on feature matching and sensitivity-assisted decision making[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(2): 112-124.
- [20] 傅国斌, 孙海斌, 王海亭, 等. 含高渗透率新能源电力系统多目标无功优化方法[J]. 高压电器, 2025, 61(5): 291-301.
FU Guobin, SUN Haibin, WANG Haiting, et al. Multi-objective reactive power optimization method for new energy power systems with high permeability[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 291-301.
- [21] 王方雨, 王海云, 于希娟, 等. 考虑越限程度的断面功率灵敏度控制方法[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3847-3855.
WANG Fangyu, WANG Haiyun, YU Xijuan, et al. Section power sensitivity control considering out-of-limit degrees[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3847-3855.
- [22] 牟颖, 张保会, 薄志谦. 防止输电断面连锁过载的快速控制算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 9-45.
MU Ying, ZHANG Baohui, BO Zhiqian. Fast control algorithm for preventing cascading overload on transmission section[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 9-45.
- [23] 徐岩, 邝静. 基于功率灵敏度的线路过载划区域紧急控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 60-72.
XU Yan, ZHI Jing. A zone-divided emergency control strategy for overload lines based on power sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 60-72.
- [24] MEHRABANKHOMARTASH M, SAEEDIFARD M, GRIJALVA S. Model predictive control based AC line overload alleviation by using multi-terminal DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 177-187.
- [25] 王子文, 张英敏, 李保宏, 等. 柔性直流电网潮流转移特性及安全运行影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 103-113.
WANG Ziwen, ZHANG Yingmin, LI Baohong, et al. Analysis of power flow transfer characteristics and influence on the safety operation of a flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 103-113.
- [26] STRUNZ K, SCHILLING S, KUSCHKE M, et al. Fast contingency analysis and control for overload mitigation in integrated high voltage AC and multi-terminal HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(4): 5575-5590.
- [27] ZHOU Yang, REHTANZ C, SEBAA K, et al. A dynamic corrective control method for congestion mitigation of hybrid AC/DC power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134.
- [28] HU Chunke, WU Xi, CAI Hui. Overload control of the embedded HVDC for hybrid AC/DC power system security enhancement[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(10): 4586-4590.
- [29] 徐政, 许烽. 输电线路交改直的关键技术研究[J]. 高压技术, 2016, 42(1): 1-10.
XU Zheng, XU Feng. Research on key technologies of AC-to-DC transmission lines conversion[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 1-10.
- [30] 王之伟, 黄俊辉, 程亮, 等. “嵌入式”直流技术在省级输电电网中的规划及应用[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 65-74.
WANG Zhiwei, HUANG Junhui, CHENG Liang, et al. Planning and application of embedded DC transmission technology in the provincial transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 65-74.
- [31] SUN Kaiqi, XIAO Huangqing, PAN Jiuping, et al. VSC-HVDC inerties for urban power grid enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4745-4753.
- [32] MOEINI A, KAMWA I, BRUNELLE P, et al. Open data IEEE test systems implemented in SimPowerSystems for education and research in power grid dynamics and control[C]// 50th International Universities Power Engineering Conference, September 1-4, 2015, Stoke on Trent, UK.
- [33] DONG Xiaoming, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Calculation of power transfer limit considering electro-thermal coupling of overhead transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1503-1511.

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-08-21

作者简介:

朱介北(1987—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制、电力电子化电力系统。E-mail: jiebei.zhu@tju.edu.cn

(编辑 石晋美)