

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201905

计及线路动态电热特性的交直流混联电网过载控制策略

胡剑¹, 王建², 熊小伏², 乌睿³

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 国家电网重庆市电力公司市区供电分公司, 重庆 400015)

摘要: 交直流混联电网中大容量直流闭锁或交流线路因故障切除会引发潮流大幅度转移, 增加电网连锁故障风险, 需及时采取安全控制措施阻断事故的扩大。为此提出一种交直流混联电网过载控制策略, 该策略充分挖掘输电线路耐受过负荷的能力, 引入导线动态电热特征量作为线路安全约束, 协调健全直流输送功率调节、机组有功调整以及切负荷等多种手段, 实现与时间关联的潮流动态优化控制。控制模型以总控制代价最小为目标函数, 经过变量的优化筛选在较短时间内得到安全且经济的过载控制方案, 可有效地避免混联电网连锁跳闸事故发生。最后, 基于改进的 IEEE39 节点交直流混联系统, 与采取不同线路安全约束条件、不同优化变量的控制方法相对比, 验证了所提过载控制策略的有效性及其优越性。

关键词: 交直流混联电网; 连锁故障; 输电线路; 动态电热特性; 过载控制

An overload control strategy for AC/DC hybrid power grid considering dynamic electro-thermal characteristics of transmission lines

HU Jian¹, WANG Jian², XIONG Xiaofu², WU Rui³

(1. CET-College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Chongqing Urban Power Supply Branch, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China)

Abstract: The blocking of large-capacity HVDC or the tripping of the AC transmission line after an accident will cause power flow transfer sharply and increase the risk of cascading faults in AC/DC hybrid power grid. Therefore, it is needed to take reasonable safety control measures to prevent the spreading of the accident in time. An overload control strategy for AC/DC hybrid power grid is proposed. This strategy brings the dynamic electro-thermal characteristics of the conductor into the safety constraints to fully excavate the short-time overload capability of transmission lines and then coordinates the active power adjustment of generators, power transmission adjustment of HVDC, and load shedding measures to realize the dynamic optimal power flow control associated with time. The optimization control model takes minimum total cost as the objective function, which can quickly obtain the economic and reasonable overload control scheme through selecting control variables, to effectively prevent cascading tripping in AC/DC hybrid power grid. Finally, compared with the control methods by adopting different line safety constraints and different optimal variables, the effectiveness and superiority of the proposed strategy are verified through case studies on the modified IEEE 39-node power systems.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. SWU119039) and National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: AC/DC hybrid power system; cascading faults; transmission line; dynamic electro-thermal characteristic; overload control

0 引言

随着越来越多的大容量直流输电工程在现有交

流电网中的投运, 交直流混联成为电网发展的趋势之一^[1-2]。无论是交流还是直流输电线路, 其输送容量增加的同时, 也给电网安全运行带来新的挑战。大容量的直流闭锁或交流线路发生故障被切除后, 使得电网出现更大的功率缺额, 将引发潮流转移, 若不能及时采取有效的控制, 转移的潮流将可能造

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (SWU 119039); 国家重点研发计划项目资助 (2016YFB0900600)

成其他正常交流线路的距离 III 段或过载保护动作, 诱发 $N-k$ 连锁跳闸, 造成大面积停电^[3-4]。因此, 如何在发生单一事故后, 采取合理有效的安全控制措施, 改变事故后的有功潮流分布以避免事故规模的扩大, 这对保证混联电网的安全稳定运行具有重要的实际意义。

针对电网事故后出现的潮流转移支路过载问题, 现有的潮流安全控制策略主要通过调整网络节点中注入的有功功率(如改变机组出力、切负荷等)来消除线路过载。具体可分为以下两类方法: ① 灵敏度法^[5-8], 即根据节点注入有功功率对线路有功潮流变化的关系, 通过线路有功潮流的越限程度反推出控制变量的调整量, 得到对应的调整方案。但该方法在交直流混联电网中存在一定的局限性, 节点功率对交流线路的有功灵敏度会随直流功率的调整而改变, 难以反推出控制变量的调整量, 且无法进行全局优化。② 优化控制法^[9-11], 即通过求解数学优化模型得出控制方案, 实现控制资源的优化调整。但模型求解算法、参与优化的变量数目都将直接影响优化方案的收敛性和计算效率, 进而影响安全控制策略的实施效果。

目前交流输电线路的输送功率或允许电流一般采用相对保守的定值作为约束。事实上, 输电线路存在“电流-导线温度-弧垂/净距”的电热力耦合关系, 其中导线温度是联系载流能力和净距安全的纽带, 是影响线路安全的关键参数。受导线热惯性影响, 导线温度变化总是滞后于运行电流变化, 这使得实际运行的输电线路具备一定程度的过载耐受能力。

目前已有学者提出将线路电流与温度的耦合关系应用至电力系统优化运行中, 在线路动态增容、电网调度等方面开展了研究。例如, 文献[12-13]提出从调度决策角度出发, 利用线路热惯性过程, 结合潮流和调度模型, 改进了现有的优化调度方法。文献[14-16]将线路动态热容量引入电力系统事故后安全分析与校正控制中, 以此提高校正控制效果。然而, 上述研究大多采用导线温度的简化计算模型^[17]来表征线路动态电热特征关系, 忽略了短时过载电流作用下导线不同部位的温度分布差异, 容易造成安全控制决策结果的偏差。而且以上研究均是关于交流系统优化调度方面, 针对交直流混联电网事故后潮流转移期间的安全控制策略鲜有研究。

鉴于此, 本文基于文献[18]中所构建的输电线路电热计算模型及过负荷热保护策略, 提出一种计及线路动态电热特性的交直流混联电网过载控制策

略。在第 1 节中, 概述了计及导线动态电热特性的过载控制策略整体思想, 第 2 节阐述了如何筛选出过载控制的优化变量, 第 3 节给出过载动态优化模型。以总控制代价最小为目标函数, 求解出安全且经济的控制方案。最后, 通过改造的交直流混联系统算例验证了该策略的有效性及其优越性。

1 交直流混联电网过载控制策略控制思想

交直流混联电网中大容量直流闭锁或交流线路切除后, 引起潮流大幅度转移, 文献[18]提出的交流输电线路热保护可以保证非故障线路能够承受首次潮流转移造成的电流冲击, 短时间内保持电网结构的完整性。在此基础上, 若结合线路动态电热特性, 进一步实施过载优化控制, 则能有效阻断事故扩大避免连锁跳闸。

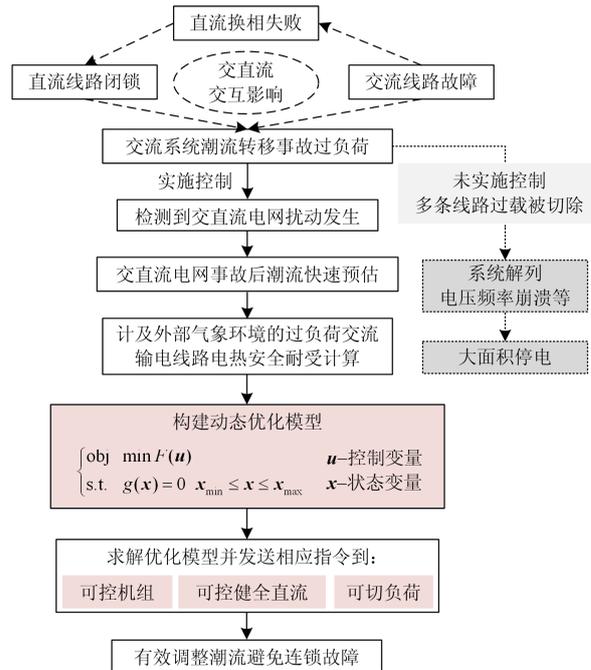


图 1 交直流电网过载控制基本结构

Fig. 1 Framework of the overload control in AC/DC power grid

本文所提出的过载控制策略结构的基本流程如图 1 所示, 其中 \mathbf{u} 为优化模型的控制变量, \mathbf{x} 为模型的状态变量。过载控制的核心问题即如何建立合理的优化模型, 将交流线路的动态安全热约束与潮流控制手段进行有效的协调优化, 具体流程如下。

(1) 在直流闭锁或交流线路切除后第一时间估算出混联电网的潮流转移情况, 并筛选出发生潮流越限的线路, 潮流越限线路在热保护作用下并未被切除, 持续支撑电网运行, 将这些线路作为待控制对象。

(2) 为避免全网的机组和负荷都参与优化而降低控制效率, 筛选出对待控制线路潮流控制效果好的机组、负荷节点, 配合健全运行的直流共同作为过载控制的手段。

(3) 根据外部气象信息和潮流估算值, 考虑线路动态电热特性, 建立潮流优化控制模型。

(4) 根据设定的约束求解出优化结果, 向健全运行的直流、可控机组及可切负荷点发送功率调整量或切除量信号, 实施控制策略调整潮流分布。

2 潮流越限判断与待控制变量选取

2.1 潮流越限线路集合

直流闭锁或交流线路因故障切除后, 首先需要确定交流电网中有哪些线路会发生潮流越限, 为此引入线路电流越限指标 σ_{ij} 。

$$\sigma_{ij} = \left| P_{ij} / P_{ij, \text{rated}} \right| \quad i, j \in S_B \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为事故后线路 L_l (对应节点 i 和 j) 的有功功率; $P_{ij, \text{rated}}$ 为线路的额定有功功率; S_B 为交直流电网的节点集合。 σ_{ij} 数值越大则代表流过线路 L_l 的有功功率越多, 当 $\sigma_{ij} > 1$ 时, 表示线路电流越限。

依据式(1)的判据, 在交直流混联电网事故后, 通过快速潮流估算并与潮流上限值进行比较, 可以将电网中所有交流线路集合 S_L 筛选划分为发生潮流越限集合 S_{L1} 和非越限集合 S_{L0} 两种类型, 且 $S_L = S_{L1} \cup S_{L0}$ 。

$$\begin{cases} L_l \in S_{L1} & \text{if } \sigma_{ij} > 1 \\ L_l \in S_{L0} & \text{if } \sigma_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 待控制变量选取

由直流稳态方程分析可知, 一旦直流系统控制方式确定, 任意换流站的功率只与该换流站的交流母线电压和该换流站通过直流相互联接的其他换流站的交流母线电压有关。因此, 换流站交流母线可以处理为 PQ 节点, 可采用解耦算法实现事故后潮流快速估算。

$$\begin{cases} \Delta P / U = B' U \Delta \theta \\ \Delta Q / U = (B'' + \Delta B'') \Delta U \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 分别为节点有功和无功功率不平衡向量; ΔU 、 $\Delta \theta$ 分别为节点电压幅值、相角的修正向量; B' 表示 P - θ 迭代修正中的系数矩阵; B'' 表示 Q - U 迭代修正中的系数矩阵。因为直流注入功率与节点电压的相角无关, 故 B' 与传统交流系统的计算一致, 但会引起增量 $\Delta B''$, 而具体增量 $\Delta B''$ 可以由直流系统不同的控制方式推出其计算公式。通常

B' 、 B'' 、 $\Delta B''$ 为定常对称矩阵, 能够满足快速解耦交替迭代的计算要求。

为提高过载控制的优化效率, 引入功率传输分布因子 (Power Transmission Distribution Factors, PTDF) 缩减控制变量^[19], 筛选出对潮流越限线路 S_{L1} 潮流控制效果好的机组和负荷作为控制变量。功率传输分布因子能够反映节点注入有功功率发生变化时, 每条线路的潮流变化量。各机组和负荷点对潮流越限线路的 PTDF 定义为

$$\begin{cases} H_l^{Gm} = \Delta P_{ij} / \Delta P_{Gm} & m \in S_G \\ H_l^{Dn} = \Delta P_{ij} / \Delta P_{Dn} & n \in S_D \end{cases} \quad (4)$$

式中: H_l^{Gm} 表示调整电网中机组 m 的有功功率变化量为 ΔP_{Gm} 时, 导致线路 L_l 上传输的有功功率变化量为 ΔP_{ij} ; H_l^{Dn} 表示改变电网中负荷 n 的有功功率变化量为 ΔP_{Dn} 时, 导致线路 L_l 上传输的有功功率变化量为 ΔP_{ij} ; S_G 和 S_D 分别为交直流电网的发电机组和负荷接入节点集合。

根据式(4), 计算出电网中所有发电机组和切负荷点对越限线路 L_l 的功率传输分布因子向量 H_l^G 和 H_l^D , 即

$$\begin{cases} H_l^G = [H_l^{G1}, H_l^{G2}, \dots, H_l^{Gm}]^T & m \in S_G \\ H_l^D = [H_l^{D1}, H_l^{D2}, \dots, H_l^{Dn}]^T & n \in S_D \end{cases} \quad (5)$$

然后求取功率传输分布因子向量的无穷大范数 $\|H_l^G\|_\infty$ 和 $\|H_l^D\|_\infty$, $\|H_l^G\|_\infty$ 和 $\|H_l^D\|_\infty$ 所包含的节点是对越限线路 L_l 的潮流控制效果最好的发电机组节点和负荷节点, 对这些发电机节点集合取并集, 得到对所有越限线路控制效果最优的发电机节点集合 $S_{G\text{best}}$ 和切负荷节点集合 $S_{D\text{best}}$, 即

$$\begin{cases} S_{G\text{best}} = \{ \|H_1^G\|_\infty, \|H_2^G\|_\infty, \dots, \|H_l^G\|_\infty \} & l \in S_{L1} \\ S_{D\text{best}} = \{ \|H_1^D\|_\infty, \|H_2^D\|_\infty, \dots, \|H_l^D\|_\infty \} & l \in S_{L1} \end{cases} \quad (6)$$

最后将 $S_{G\text{best}}$ 集合中发电机组 m 的有功功率 P_{Gm} 、 $S_{D\text{best}}$ 集合中负荷 n 有功功率切除量 ΔP_{Dn} , 以及 S_{DC} 集合中健全直流 k 的功率调整增量 ΔP_{DCk} , 共同选取为模型的控制变量 u , 可表示为

$$u = \{ P_{Gm}, \Delta P_{Dn}, \Delta P_{DCk} \} \quad m \in S_{G\text{best}}, n \in S_{D\text{best}}, k \in S_{DC} \quad (7)$$

综上分析, 在交直流混联电网中某些线路因故障被切除后的第一时间, 通过快速潮流估计和功率传输分布因子计算, 合理选取控制变量参与后续的过载控制, 提高控制效率以便于在线应用。控制变量选取流程, 如图 2 所示。

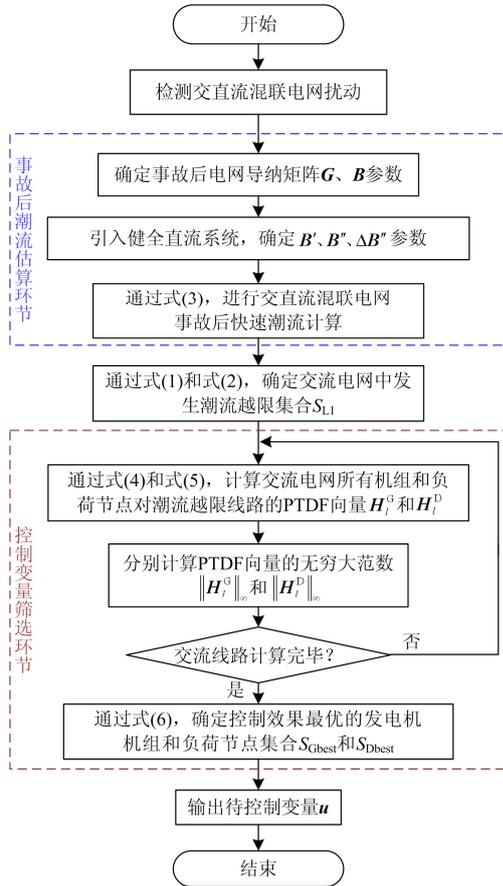


图2 事故后潮流越限线路和待控制变量的选取流程

Fig. 2 Flowchart of post-accident power flow over-limit line and control variables selection for overload control

3 交直流混联电网过载控制模型

3.1 控制目标

事故后过载控制采取发电机组有功功率调节, 健全直流功率调整, 必要时配合切负荷等手段, 实现功率平衡并最终阻断潮流转移。

其中, 发电机组有功控制代价为

$$f_1 = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{m \in S_{Gbest}} (a_m + b_m P_{Gm,t} + c_m P_{Gm,t}^2) dt \quad (8)$$

式中: S_{Gbest} 为参与过载控制的发电机组节点集合; $P_{Gi,t}$ 为发电机组 m 在 t 时刻的有功输出; a_m 、 b_m 和 c_m 分别为发电机组有功调整代价函数的常数项、一次项和二次项系数; t_0 为控制初始时刻; t_f 为控制的结束时刻; $[t_0, t_f]$ 为过载控制时间区间。

健全直流参与控制代价为

$$f_2 = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{k \in S_{DCbest}} d_k \cdot P_{DCk,t} dt \quad (9)$$

式中: S_{DC} 为事故后仍健全运行的直流系统所包含的节点集合; $P_{DCk,t}$ 为健全直流节点或直流换流站 k

在 t 时刻的有功输出; d_k 为直流有功功率的控制成本。一般直流有功功率控制代价要小于发电机组的有功功率调整代价^[20]。

在过载控制中应当尽量减少负荷损失, 当发电机组功率、健全直流功率调整不能满足时, 才需要考虑切除部分负荷来降低电网中过载线路的功率。因此, 切分负荷代价为

$$f_3 = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{n \in S_{Dbest}} e_n \cdot \Delta P_{Dn,t} dt \quad (10)$$

式中: S_{Dbest} 为参与过载控制的切负荷节点集合; $\Delta P_{Dn,t}$ 为负荷节点 n 在 t 时刻的有功功率切除量; e_n 为不同切负荷节点 n 的切除等效代价, 能够反映切负荷造成的经济损失和责任赔偿, 根据可切负荷点的重要性, 其取值也有所不同。

针对上述多目标函数, 本文采用加权求和方式将其转化单目标函数处理, 以整体控制代价最小为目标, 即

$$\min F = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 \quad (11)$$

式中, w_1 、 w_2 、 w_3 分别为各项子目标的权重因子。可以利用判断矩阵方法, 对发电机组、健全直流、切负荷手段赋予不同的权重^[21]。

3.2 约束条件

交直流混联电网事故后过载控制模型的约束条件包括以下几个部分。

1) 等式约束

(1) 交直流混联电网节点功率平衡方程

$$\begin{cases} P_{Gi,t} - P_{Di,t} + \Delta P_{Di,t} - U_{i,t} \sum_{j \in i} A U_{j,t} \pm P_{DCi,t} = 0 \\ Q_{Gi,t} - Q_{Di,t} + \Delta Q_{Di,t} - U_{i,t} \sum_{j \in i} B U_{j,t} \pm Q_{DCi,t} = 0 \\ \Delta Q_{Di,t} = \beta_i \cdot \Delta P_{Di,t} \quad i \in S_B \\ A = (G_{ij,t}(T_{l,t}) \cos \theta_{ij,t} + B_{ij,t}(T_{l,t}) \sin \theta_{ij,t}) \\ B = (G_{ij,t}(T_{l,t}) \sin \theta_{ij,t} - B_{ij,t}(T_{l,t}) \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{Gi,t}$ 、 $Q_{Gi,t}$ 为节点 i 在 t 时刻发电机组的有功和无功输出功率; β_i 为节点 i 在 t 时刻切除负荷有功功率 $\Delta P_{Di,t}$ 时对应无功负荷 $\Delta Q_{Di,t}$ 的比例(取决于负荷功率因数); $P_{Di,t}$ 和 $Q_{Di,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷有功和无功功率, 可以根据负荷预测考虑控制期间内负荷功率发生变化造成的影响; $U_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压幅值; $\theta_{ij,t}$ 为节点 i 和节点 j 在 t 时刻的相角差; $Q_{DCi,t}$ 为交流系统与换流站 i 之间的无功功率, 正负号表示馈入或馈出交流电网, 取决于换流变压器和换流器无功控制损耗以及无功补偿控制手

段, 通常要求直流系统与交流系统交换之间基本上没有无功交换, 即“零无功交换原则”^[22]。

(2) 计及输电线路动态热特性电阻-电流方程

由输电线路动态热特性分析可知, 线路电阻具有温变特性, 因此系统导纳矩阵会受到温度的制约, 线路通过的电流 $I_{l,t}$ 也会受到影响。

$$\begin{cases} G_{ij,t}(T_{l,t}) = \frac{-R_{l,t}(T_{l,t})}{(R_{l,t}(T_{l,t}))^2 + (X_l)^2} \\ B_{ij,t}(T_{l,t}) = \frac{X_l}{(R_{l,t}(T_{l,t}))^2 + (X_l)^2} \end{cases} \quad (13)$$

$$I_{l,t} = I_B \sqrt{\frac{(G_{ij,t}^2(T_{l,t}) + B_{ij,t}^2(T_{l,t}))^2 \times ((U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t} \cos \theta_{ij,t}))}{(U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t} \cos \theta_{ij,t})}} \quad (14)$$

$$l \in (i, j) \quad i, j \in S_B$$

式中: $G_{ij,t}$ 和 $B_{ij,t}$ 分别表示受温度影响下的节点导纳矩阵参数; $R_{l,t}(T_{l,t})$ 为导线温度为 $T_{l,t}$ 时的线路电阻值; X_l 为线路的电抗值; I_B 为线路电流基准值。

(3) 输电线路的动态热平衡状态方程

$$\frac{dT_{l,t}}{dt} = A_{l,t} T_{l,t} + B_{l,t} U_{l,t} \quad l \in S_L \quad t \in [t_0, t_f] \quad (15)$$

现有的标准模型在计算导线温升时, 简化了导线结构及传热过程, 将导线视为等温体, 仅得到导线表面或平均温度。虽然能反映长时段内稳态下导线电热耦合效应, 但却难以表征导线内部的温度分布特性及暂态温升响应差异。如图 3 所示, 试验研究证明由于导线集肤效应、外部强迫对流散热、不同绞合材料传热特性等因素的影响, 运行的架空输电线路截面会呈现温度梯度分布, 导线不同部位的温升响应也会有所差异^[18]。

基于文献[18]中所构建的输电线路电热计算模型, 过载控制期间线路的温度 $T_{l,t}$ 变化与电流、外部气象(风速、日照、环境温度等)密切相关, 通过线路热网络模型 $A_{l,t}$ 、 $B_{l,t}$ 和 $U_{l,t}$ 矩阵参数得以反映。控制期间的气象参数可以通过气象监测或气象部门的观测站获取, 同时考虑控制过程相对较短, 可以假定控制期间的气象参数不变。控制初始时刻 t_0 的导线温度初值可以通过热网络模型求解得到, 其中焦耳热量的电流值可以通过式(14)计算得到。

2) 不等式约束

(1) 交直流混联电网的安全约束

在事故后过载控制过程中, 为了防止出现电压或频率失稳问题, 应保证系统的节点电压和相角都在合理范围之内。其中, 节点电压幅值约束为

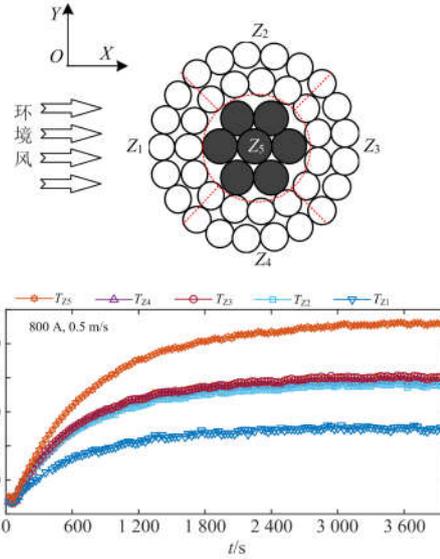


图 3 架空输电线路截面传热分析

Fig. 3 Heat transfer analysis of overhead transmission line cross-section

$$U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \quad (16)$$

式中, $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为节点电压的上下限。

线路首末两端相角差约束为

$$-\theta_{ij,\max} \leq \theta_{ij,t} \leq \theta_{ij,\max} \quad (17)$$

式中, $\theta_{ij,\max}$ 为相角差的上值。

(2) 过载控制量约束

参与控制的发电机组有功和无功输出约束为

$$\begin{cases} P_{Gi,\min} \leq P_{Gi,t} \leq P_{Gi,\max} \\ Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi,t} \leq Q_{Gi,\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{Gi,\max}$ 和 $P_{Gi,\min}$ 分别为机组 i 的有功输出上下限; $Q_{Gi,\max}$ 和 $Q_{Gi,\min}$ 为为机组 i 的无功输出上下限。

健全直流系统的有功功率约束为

$$P_{DCi,\min} \leq P_{DCi,t} \leq P_{DCi,\max} \quad (19)$$

式中, $P_{DCi,\min}$ 和 $P_{DCi,\max}$ 分别为直流传输的最小和最大有功输送功率。利用健全直流参与系统的潮流调整时, 允许直流短时过载运行, 通常设定为直流额定功率的 1.2 倍; 同时也规定直流最小有功输送功率, 通常取直流额定功率的 0.1, 以满足换流器的持续换相要求, 保证直流安全运行^[23]。

参与控制的负荷有功功率切除量约束为

$$0 \leq \Delta P_{Di,t} \leq \Delta P_{Di,\max} \quad (20)$$

式中, $\Delta P_{Di,\max}$ 为可切有功功率负荷上限值。

(3) 输电线路安全运行约束

目前输电线路运行标准常采用单一温度 T_{limit} 作为长期运行的温度限值, 但从线路热网络模型分析可知, 导线截面存在温度梯度分布, 且影响线路

弧垂安全的钢芯层温度更高, 对于潮流越限的输电线路而言, 影响其安全的本质是运行温度与承受时间共同作用的结果(即热累积量)。因此, 为充分挖掘潮流越限线路在控制期间的载流能力, 本文引入式(15)所求解的线路温度向量作为表征输电线路运行安全的指标, 并采用热累积量来代替长期允许温度作为线路的安全约束。在控制期间的 t 时刻, 当线路 l 的钢芯层温度 $T_{l,t}^{\text{steel}}$ 超过长时间运行温度 T_{limit} 时, 依据式(21)求取温度差与时间的积分值 $W_{l,t}^{\text{steel}}$, 作为安全约束指标, 即

$$W_{l,t}^{\text{steel}} = \int_t^{t_f} (T_{l,t}^{\text{steel}} - T_{\text{limit}}) dt, \text{ if } T_{l,t}^{\text{steel}} > T_{\text{limit}} \quad (21)$$

$$l \in S_{L1} \quad t \in [t_0, t_f] \quad \begin{cases} W_{l,t}^{\text{steel}} \leq W_{l,\max}^{\text{steel}} \\ T_{l,t}^{\text{alu}} \leq T_{l,\max} \\ T_{l,t}^{\text{steel}} \leq T_{l,\max} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $W_{l,\max}^{\text{steel}}$ 为钢芯层热累积量的极限值; $T_{l,\max}$ 为输电线路的最高允许温度, 线路钢芯或铝层温度超过该值时, 将会对输电线路的机械强度等产生永久性损伤; T_{limit} 、 $T_{l,\max}$ 和 $W_{l,\max}^{\text{steel}}$ 参数值取决于导线的具体类型及运行情况等因素。对于常用的钢芯铝绞线来说, T_{limit} 通常取为 70°C , $T_{l,\max}$ 可以取 100°C ; 而在 $70\sim 100^\circ\text{C}$, 常用的钢芯铝绞线允许运行数 10 min , 不会影响其机械强度、寿命损失及弧垂变化^[24]。因此, 本文 $W_{l,\max}^{\text{steel}}$ 可取 $6\,000^\circ\text{C}\cdot\text{s}$, 这样能在保证线路安全的前提下, 挖掘一定的潮流耐受能力^[25]。

针对未发生功率越限的输电线路, 由于运行电流值低于额定值, 故线路动态热特性对模型控制的效果影响较小。为简化后续模型的计算, 同时避免由于控制实施而造成未越限线路的电流过度被提升, 本文采用静态热定值作为未发生潮流越限的输电线路安全约束。

$$-I_l^{\max} \leq I_{l,t} \leq I_l^{\max} \quad l \in S_{L0} \quad t \in [t_0, t_f] \quad (23)$$

式中, I_l^{\max} 为未发生潮流越限的线路 l 的静态热定值, 可以通过 IEEE 或 GIGRE 架空线路温度计算标准模型求得。

(4) 功率调整速率约束

无论是健全直流, 还是发电机机组, 其功率的调整速率均是有限的, 其约束为

$$\begin{cases} -P_{Gm,\max}^v \leq \frac{dP_{Gm,t}}{dt} \leq P_{Gm,\max}^v \\ -P_{Dck,\max}^v \leq \frac{dP_{Dck,t}}{dt} \leq P_{Dck,\max}^v \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{Gm,\max}^v$ 为机组 m 有功输出的最大变化速率; $P_{Dck,\max}^v$ 为健全直流 k 有功输送功率的最大调整速率。理论上直流功率能够实现快速控制, 但对于健全运行的实际直流系统, 考虑到其功率升降对交流系统产生影响, 因此直流调控功率的幅度和速度会有一定的限制。

综上, 在交直流混联电网中, 当大容量直流闭锁或交流线路因故切除后, 式(8)一式(24)构成事故后过载控制目标和约束条件。

4 算例验证与分析

4.1 算例说明

本文采用改进的 IEEE39 节点系统对所提出的潮流控制策略进行验证。对原系统进行如下改造: 将交流线路 L_{26-37} 替换为直流线路 HVDC 1, 将交流线路 L_{17-18} 替换为直流线路 HVDC 2, 将交流线路 L_{4-14} 替换为直流线路 HVDC 3。改进后的 39 节点系统构成了一个典型的交直流混联电网, 如图 4 所示。系统的基准电压和基准容量分别取 230 kV 和 100 MVA 。电网中输电线路假设均采用 LGJ 400/35 型号, 线路电阻 $0.004\,05\text{ p.u.}$ 、电抗 $0.029\,025\text{ p.u.}$ 、电导为 $0.310\,95\text{ p.u.}$, 潮流转移期间气象参数分别为: 环境温度 25°C 、风速 0.1 m/s 、日照强度 $1\,000\text{ W/m}^2$ 。

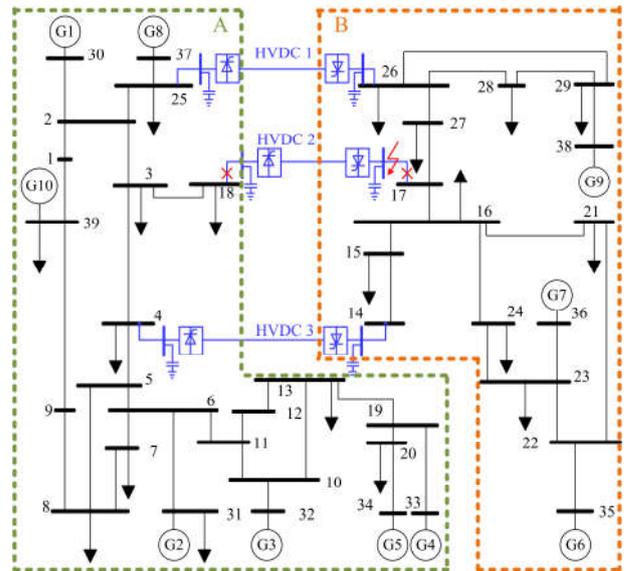


图 4 改进后的 39 节点交直流混联系统

Fig. 4 Modified 39-node AC/DC hybrid power grid

假设 t_0 时刻直流线路 HVDC 2 发生单极闭锁, 造成电网有功潮流转移。为此, 系统实施紧急过载控制以阻断事故的蔓延。根据图 2 所示流程, 首先对事故后的交直流混联电网进行快速潮流估算, 确定事故发生潮流越限的线路为线路 L_{3-4} 和线路

L_{9-39} 。然后通过计算功率传输分布因子向量, 选取 1 号、8 号、9 号和 10 号机组, 负荷节点 16、27、29, 以及健全直流线路 HVDC 1 作为本次事故的控制变量。系统中每条线路均配备具有自适应调整功能的过负荷热保护装置, 可保证线路在到达温度极限之前不被切除, 以维持网架的完整性。

考虑到机组功率调整、直流功率调节以及切负荷的控制代价差异性, 根据判断矩阵法, 在总目标函数中的权重分别取为 $w_1=0.18$ 、 $w_2=0.02$ 和 $w_3=0.8$ 。事故后容许的潮流控制时间为 $t_f-t_0=20\text{ min}$ ^[26], 选取控制步长为 $\Delta t=1\text{ min}$ 。控制期间系统各节点的安全运行约束条件分别为: 电压 0.95~1.05 p.u.、最大相角差 45° 。输电线路动态热安全约束条件分别为: 长期运行最高允许温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 、短时温度极限值 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 、钢芯热累积量极限值 $6\ 000\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}$ 。

在上述事故和约束条件下, 为了体现直流和线路动态热特性参与潮流调控的效果, 本节设置以下三种不同的过载优化控制方案。

方案 A: 控制变量为健全可控直流、可控发电机组的有功功率以及可切负荷, 以钢芯层温度热累积量作为输电线路安全约束, 即本文所提的模型。

方案 B: 控制变量与方案 A 一致, 将输电线路的安全约束考虑为温度定值约束, 即控制期间输电线路钢芯及铝层所有部位的温升均不超过长期运行

温度限制 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。

方案 C: 控制变量仅为方案 A 中的发电机组和负荷节点功率, 不包含直流, 并将输电线路的安全约束考虑为传统的电流定值约束, 即控制期间输电线路允许运行电流均不超过静态热定值。

4.2 过载控制策略验证

利用预测-校正原对偶内点法对以上三种方法进行求解, 得到事故后交直流混联系统的过载优化控制结果分别如图 5—图 7 所示。

由于直流闭锁事故后, 交直流混联电网潮流大幅转移, 使得线路 L_{4-14} 和 L_{17-18} 的传输电流发生明显跃变, 图 5(a)为采用方案 A 的过载控制变量输出结果, 包括可控机组、可控直流以及可切负荷节点的有功输出功率。图 5(b)为潮流越限线路 L_{4-14} 和 L_{17-18} 在控制期间的电流曲线和对应线路的钢芯与不同部位铝层温升曲线。可以发现, 在方案 A 下, 虽然线路 L_{4-14} 和 L_{17-18} 的温升会短时超过允许值 $70\text{ }^\circ\text{C}$, 但整个控制期间线路的热累积量均在安全约束限制之下, 过载控制期间仅机组和直流参与调整, 不需要切除负荷即可满足安全约束。这说明方案 A 能够充分利用线路的电热安全耐受能力, 挖掘线路的输电潜能, 在保证线路安全的前提下减小过载控制代价, 提高事故后过载控制的灵活性, 验证了本文控制策略的有效性。

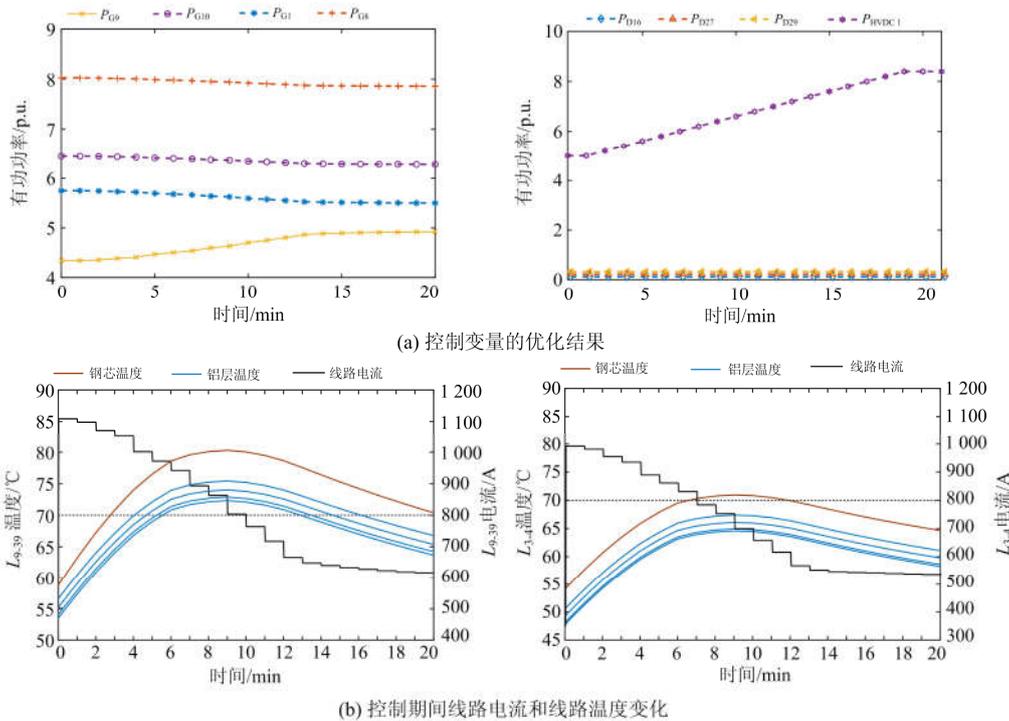


图 5 电网事故后采用方案 A 得到的过载控制结果

Fig. 5 Overload control results of Case A after power grid fault

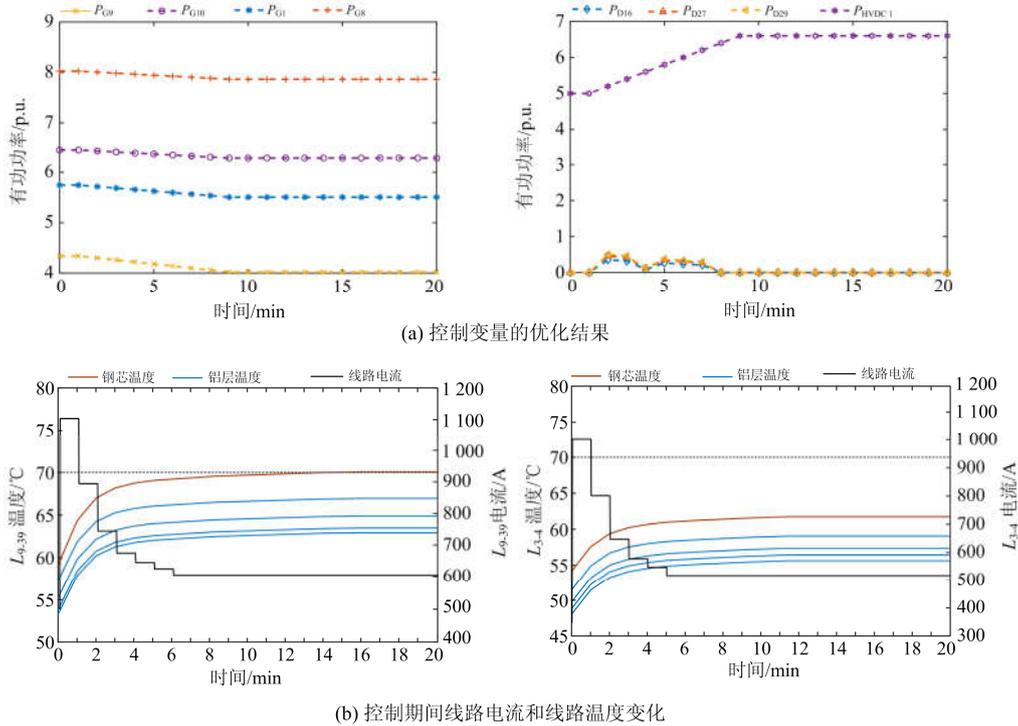


图 6 电网事故后采用方案B得到的过载控制结果

Fig. 6 Overload control results of Case B after power grid fault

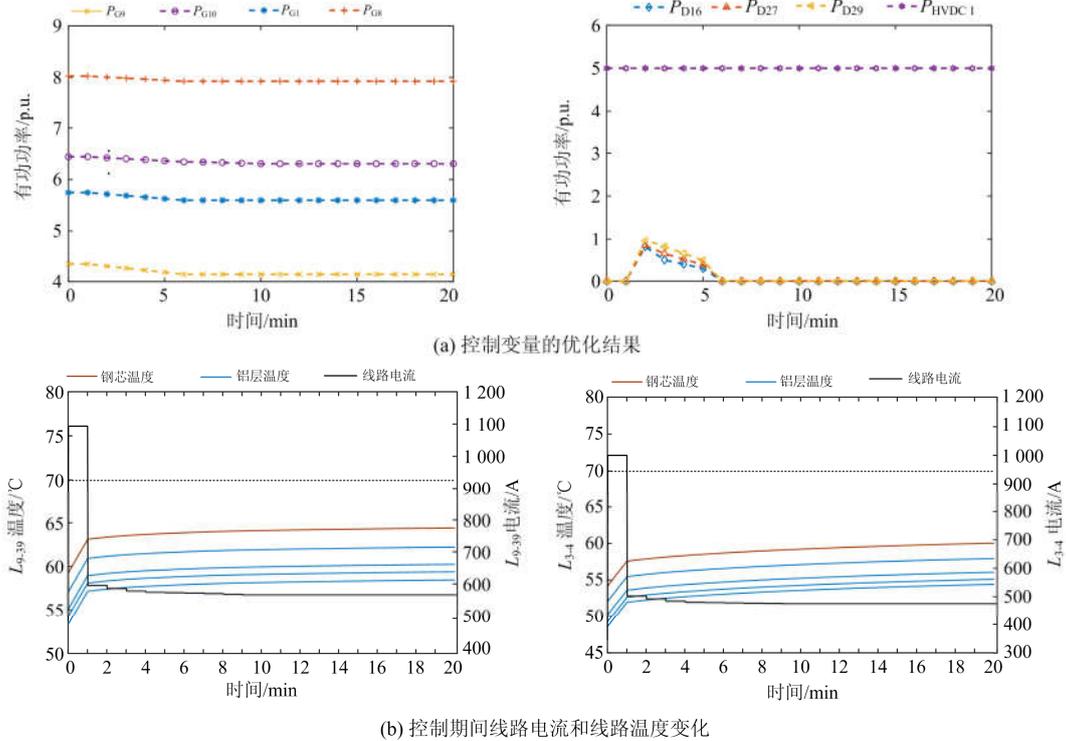


图 7 电网事故后采用方案 C 得到的过载控制结果

Fig. 7 Overload control results of Case C after power grid fault

由图 6 可知, 由于控制方案 B 的输电线路安全约束是导线最高允许温度限制(70 °C), 所以相比方

案 A 而言, 过载控制需要调整更多的机组和直流有功输出功率, 且需要配合切除一定量的负荷, 才能

将线路的电流和温升控制在安全约束条件以内，因此过载控制代价有所增加。可以发现，在潮流转移的紧急控制期间，方案 B 不允许导线温度超过 70 °C，虽然能够在一定程度利用线路电热特性优化控制代价，但线路紧急载流能力设置仍过于保守，线路暂态温升过程的电热安全耐受能力尚未充分挖掘。

由图 7 可知，控制方案 C 并未采用直流的潮流调控能力，且输电线路安全约束考虑为传统的电流定值约束。因此，相比方案 A 和方案 B 而言，方案 C(即传统控制方案)约束条件过于苛刻，过载控制需要更大幅度的切负荷量和机组有功功率调整量，才能将线路的电流降低到允许限值以下，此时过载控制代价相比前两者都有所增多。通过图 7(b)控制期间的线路温度变化轨迹可以发现，虽然导线电流接近静态热容量，但导线暂态温升变化很小且始终在安全限值以下，这说明用导线温度作为线路安全运行的约束条件比静态热容量更合理。

采用三种控制方案的过载控制效果如表 1 所示。三种方案的控制策略均能阻断交直流混联电网事故后潮流的大范围转移，但方案 A 即本文提出的优化控制策略代价最低。方案 B 虽然利用了导线的短时过载耐受能力，但导线安全约束较为苛刻，控制成本更高。方案 C 未利用线路过载耐受能力，控制成本最高。

表 1 不同控制方案的优化控制结果

Table 1 Results of overload optimization control adopting different plans

方案	调整量/p.u.			F/\$
	机组	直流	切负荷	
A	3.8	3.4	0	98.78
B	5.3	1.6	5.6	483.75
C	8.2	0	7.4	684.73

综上所述，在事故后过载控制优化模型中，根据导线的动态电热特性，引入输电线路短时过载耐受能力，通过协调健全直流调整和机组出力的调控等多种手段，能够克服以往线路传输安全约束保守、控制方式单一等缺陷，在保证线路安全的前提下，提高控制效果。

5 结论

本文提出了一种计及线路动态电热特性的事故后过载控制策略，并构建了相应的优化模型及其求解方法，该策略能够有效阻断交直流混联电网的潮流转移和事故扩散，通过研究，得出以下结论。

1) 本文所提的过载控制策略根据控制期间导

线的暂态温升轨迹，采用钢芯的热累积量作为线路安全约束，相比于采用静态热定值或保守的导线温度作为安全约束，能最大限度地挖掘输电线路的短时过载能力，实现潮流优化控制。

2) 过载控制策略中构建的优化模型能够合理地协调健全直流、机组功率调节特性与线路暂态温升特性，在保证线路安全的前提下以最小的控制代价，实现事故后最优的潮流控制。使用改造的交直流混联电网进行测试，验证了本方法的有效性。

3) 过载控制策略具备控制变量的筛选环节，相比于常规优化控制方法，可克服过多甚至全网的设备都参与控制的弊端，能够有效提高潮流控制的实施效率。

参考文献

- [1] 刘洪波, 边娣, 孙黎, 等. 交直流混联系统机电—电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 39-47.
LIU Hongbo, BIAN Di, SUN Li, et al. Electromechanical transient-electromagnetic transient hybrid simulation of AC/DC hybrid system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 39-47.
- [2] 董希建, 罗剑波, 李雪明, 等. 交直流混联受端电网频率紧急协调控制技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 59-66.
DONG Xijian, LUO Jianbo, LI Xueming, et al. Research and application of frequency emergency coordination and control technology in hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 59-66.
- [3] TARHAN F, SALMA C. Turkish power system & 31st March 2015 Blackout[R]. 2015.
- [4] MIRSAEIDI S, DONG X, TZELEPIS D, et al. A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 160-172.
- [5] LI B, SANSVINI G. Effective multi-objective selection of inter-subnetwork power shifts to mitigate cascading failures[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 134: 114-125.
- [6] HAZARIKA D, DAS M B. Use of transmission line having SPFC for alleviation of line over load of transmission line of an interconnected power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 722-729.
- [7] ZENG L, CHIANG H D. Toward an online minimum number of controls for relieving overloads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1882-1890.
- [8] GOU B, ZHANG H. Fast real-time corrective control

- strategy for overload relief in bulk power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(12): 1508-1515.
- [9] BI R, LIN T, CHEN R, et al. Alleviation of post-contingency overloads by SOCP based corrective control considering TCSC and MTDC[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(9): 2155-2164.
- [10] ARYA L D, KOSHTI A. Anticipatory load shedding for line overload alleviation using teaching learning based optimization (TLBO)[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 862-877.
- [11] MAZZI N, ZHANG B, KIRSCHEN D S. An online optimization algorithm for alleviating contingencies in transmission networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5572-5582.
- [12] BANAKAR H, ALGUACIL N, GALIANA F D. Electrothermal coordination part I: theory and implementation schemes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 798-805.
- [13] ALGUACIL N, BANAKAR M H, GALIANA F D. Electrothermal coordination part II: case studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1738-1745.
- [14] WANG M, YANG M, WANG J, et al. Contingency analysis considering the transient thermal behavior of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4982-4993.
- [15] BUCHER M A, ANDERSSON G. Robust corrective control measures in power systems with dynamic line rating[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2034-2043.
- [16] 毛思杰, 贾燕冰, 张琪. 计及过载线路发热严重程度的紧急控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 34-42.
MAO Sijie, JIA Yanbing, ZHANG Qi. Research on emergency control method considering severity of overheating of overload line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 34-42.
- [17] IEEE. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors: IEEE Std 738—2012[S]. Washington, DC, USA: IEEE Standard Association, 2013.
- [18] HU Jian, XIONG Xiaofu, WANG Jian. Current tolerance capability calculation model of transmission lines and its application in overload protection[J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 46(14): 1509-1521.
- [19] LUO C, HOU Y, WEN J, et al. Assessment of market flows for interregional congestion management in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1673-1682.
- [20] 李兆伟, 任先成, 刘福锁, 等. 交直流并联电网中直流功率紧急控制影响及优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 104-109.
LI Zhaowei, REN Xiancheng, LIU Fusuo, et al. Research on effects and optimization of emergency DC power control in AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 104-109.
- [21] 吕涛, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 分布式电源与配电网架多目标协调规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 139-145.
LÜ Tao, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 139-145.
- [22] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.
ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21.
- [23] KWON D, KIM Y J, MOON S I. Modeling and analysis of an LCC HVDC system using DC voltage control to improve transient response and short-term power transfer capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1922-1933.
- [24] 戴沅, 程养春, 钟万里, 等. 高压架空输电线路动态增容技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [25] CIGRE WG B2.42. Guide to the operation of conventional conductor systems above 100°C[R]. Paris, France: CIGRE, 2015.
- [26] 王孟夏, 韩学山. 基于电热协调的电网安全校正控制方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 32-36.
WANG Mengxia, HAN Xueshan. Realization of security corrective control considering electro-thermal coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 32-36.

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-09-19

作者简介:

胡剑(1992—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: expujian@foxmail.com

王建(1986—), 男, 博士后, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制, 电网风险评估与气象灾害;

熊小伏(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制, 新能源并网故障分析, 电网风险评估与气象灾害。

(编辑 许威)