

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190035

有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护

陈璟, 熊小伏, 胡剑, 王建

(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)

摘要: 由于内外部扰动引起的有功不平衡, 系统频率和线路电流会出现明显的波动、过渡及恢复过程, 需关注系统状态恢复过程中的导线热力安全, 采取合理的保护策略。分析了电网有功不平衡下电流和频率的动态特性, 研究了不同低频减载方案对频率恢复速率和导线温升过程的影响, 提出了电网有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护策略。通过 IEEE39 节点系统仿真测试, 验证了所提策略的有效性。仿真结果表明: 不同类型的大扰动下, 不同的低频减载布点位置和数量以及低频减载整定方案对导线温升响应的影响及延迟过载热保护动作时间的效果不同。所提出的输电线路过载热保护能够最大限度地挖掘线路耐受事故过负荷的能力, 在兼顾系统频率恢复的同时, 避免线路温升越限出现新的连锁故障。

关键词: 有功不平衡; 低频减载; 输电线路; 温升响应; 过载热保护

Thermal overload protection of transmission lines considering the influence of UFLS under active power imbalance

CHEN Jing, XIONG Xiaofu, HU Jian, WANG Jian

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Power frequency and transmission line current show a distinct process of fluctuation, transition, and recovery when massive active power imbalance occurs, which is caused by internal and external disturbances. Thus, attention should be paid to the thermal safety of conductor, and reasonable protection strategy should be adopted during the recovery of power system. In this paper, the dynamic characteristics of power frequency and line current are analyzed. Furthermore, the influence of different UFLS schemes on the frequency recovery rate and conductor temperature rise response is also studied. Thermal overload protection of transmission lines considering the influence of UFLS under active power imbalance is proposed. The effectiveness of the proposed protection strategy is verified on IEEE 39-bus power system. The simulation results show that different location, number and setting scheme of UFLS have different influence on conductor temperature rise response and time delay of protection under different disturbances. The proposed overload thermal protection can maximize the capacity of the transmission lines to withstand emergency overload, and avoid new cascading fault due to conductor temperature off-limit when the power frequency is recovery.

This work is supported by the Youth Science Fund Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51707018), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600), and Chongqing Postdoctoral Research Project Special Funding (No. Xm2017106).

Key words: active power imbalance; UFLS; transmission lines; temperature rise response; thermal overload protection

0 引言

电力系统时刻处在各种内外部扰动作用下, 如

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(51707018); 国家重点研发计划资助(2016YFB0900600); 重庆市博士后科研项目特别资助(Xm2017106)

气象灾害冲击导致的故障、电气绝缘破坏导致的放电、设备投切操作产生的扰动、冲击负荷变化等。由于扰动而突然产生大的有功不平衡后, 系统频率及线路电流会产生比较明显的波动、过渡及恢复过程, 期间系统处于振荡、潮流转移过负荷等非故障异常运行工况。继电保护和低频减载(Under Frequency Load Shedding, UFLS)分别作为保证电力

系统安全稳定运行的第一道和第三道防线，在识别系统故障和异常工况、维系电网功率平衡方面起着不可或缺的作用^[1-2]。

针对系统有功不平衡，现有研究主要从低频减载方案改进着手，在传统“逐次逼近”法^[2]的基础上，有研究提出了增加频率变化率判据的半适应法^[3]和自适应法^[4]，在有效减少低频减载的切负荷量、抑制系统频率跌落深度方面取得了良好的效果，但现有研究更多关注有功不平衡对电力系统频率稳定^[1-4]及发电机组安全^[2]的影响。输电线路是电网的重要组成部分，有功不平衡时，输电线路所承受的电压以及传输的电流均会发生变化，且当有功调控措施介入后将进一步影响这种变化，但现有研究却很少关注有功不平衡对输电线路安全性能的影响，缺乏有功缺额下的输电线路安全分析及对应的保护策略。

目前，在提升继电保护应对振荡及过负荷系统异常工况方面的研究主要分为两类：一是利用本地信息改进与完善保护策略^[5-10]，通过增强保护对过负荷^[7]、振荡^[8-9]及故障^[7,10]的识别能力，实现保护的可靠闭锁，防止系统异常运行工况下保护误动带来的连锁反应；二是从“三道防线”协调的角度综合考虑问题，通过安稳装置与继电保护的配合来保证系统的安全稳定运行^[11-13]。文献^[12]利用线路热惯性延长过负荷下保护的動作时间，提出了一种过负荷下继电保护与安稳装置的协调策略，通过继电保护与安稳装置的配合，在保证电力元件安全的基础上兼顾系统运行安全。“三道防线”之间既相互配合又彼此影响，安稳装置的動作必然会影 响电力系统运行状态，进而影响继电保护在系统异常工况下的動作情况，然而现有研究却很少关注这种影响。

与发电机、变压器等元件不同，保证线路的绝缘距离和热力安全限值要求，输电线路即可正常工作。目前国内外对于输电线路安全性的评判，主要是从线路运行的视角开展，通过监测导线输送容量、温度、弧垂、应力等多个运行参数，对线路的安全性进行评判。线路载流、温度及弧垂三者之间相互影响，由此形成架空输电线路电-热-力耦合的动态过程。导线温度升高伴随着弧垂增大，研究表明，对代表档距为 300 m 的导线，导线温度每增加 10 °C，弧垂会增加 0.36 m^[14]，弧垂越限可能引发分裂导线混线，相与相、相与地之间距离减小而放电，危及输电线路安全运行。由于表征线路安全运行中的各参数与导线的运行温度均有直接或间接的关系，因此温度可作为输电线路安全运行评估的关键因素。

电网受扰有功不平衡下，导线电流会经历一个或长或短、或大或小的振荡，然后达到新的稳态的过程。现有研究在计算导线温升时，或将导线电流视为从一个稳态到另一个稳态的阶跃过程^[12,15]，或关注振荡电流作用下导线温升响应^[16]，对有功不平衡下不同电流形态作用下的导线温升响应却少见报道。实际电力系统中，因内外部扰动引发系统振荡和过负荷，同时会造成较大的功率缺额^[17-21]，期间伴随频率有功控制，低频减载装置会对频率下降做出响应，通过多轮次动作切除一定数量的负荷，从而改变系统中潮流分布，影响导线温升响应过程，进而影响输电线路运行安全，但现有研究还未考虑这一影响。

针对上述问题，本文在分析电网有功不平衡下电流及频率动态特性的基础上，分析输电线路的热力安全，研究低频减载的投入对输电线路温升响应的影响，提出计及低频减载影响的输电线路过载热保护策略。最后通过算例分析，对所提过载热保护策略进行了验证。结果表明：不同类型的大扰动下，低频减载布点位置和数量以及低频减载整定方案，对导线温升响应的影响及延迟过热保护动作时间的效果不同。所提出的输电线路过载热保护能最大限度地挖掘输电线路耐过负荷的能力，在兼顾系统频率恢复的同时保证输电线路热力安全。

1 有功不平衡下的输电线路安全特性分析

1.1 线路电流和频率动态特性

系统中突然出现较大的有功功率缺额时，如平行输电通道中交流线路跳闸、直流闭锁等，系统不平衡功率将在剩余各机组间重新分配，导致各机组的转速发生变化，表现为系统功率和频率发生波动。以图 1 所示的互联系统图说明电网有功不平衡下线路电流的变化情况。

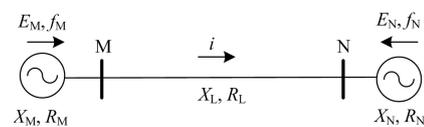


图 1 互联系统示意图

Fig. 1 Diagram of an interconnected power system

经过推导，可得到电流 i 的时域表达式为^[22]

$$i(t) = 2I_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\alpha_0}{2}\right) \times \sin\left(\omega_s t + \frac{\alpha_0}{2}\right) \quad (1)$$

式中： I_m 表示电流幅值， $I_m = |E_{\max}/Z_{\Sigma}|$ ， E_{\max} 表示电源电动势最大值， Z_{Σ} 表示系统总阻抗； $\omega_0 = (\omega_M + \omega_N)/2$ ， $\omega_s = (\omega_M - \omega_N)/2$ ， ω_M 、 ω_N 分别表示

两侧系统角频率; α_0 为 M 侧电动势形成的电流初相角。

电网有功不平衡下, 不仅体现为电流的动态变化, 频率也会呈动态变化。同步互联的电力系统在稳态运行时, 各节点频率相同, 但在系统动态过程中, 即发生扰动时, 由于频率的时空分布效应, 系统中不同节点频率不尽相同^[23-24]。在传统的电力系统研究中, 对电力系统频率动态行为的分析多是基于系统平均频率进行的, 忽略了区域电网的相对独立性, 默认区域频率特性与系统平均频率特性一致^[25]。但事实上, 当系统平均频率偏移不明显时, 区域之间已经存在振荡并伴随着传输功率的剧烈波动。

频率的降低会影响设备的性能和寿命, 危及发电设备尤其是汽轮机的安全, 汽轮机在频率降低状态下的允许运行时间^[26]如表 1 所示。频率的持续降低, 还会使发电机组出力显著降低, 进一步加剧系统功率缺额, 使系统电压水平降低, 系统的稳定性遭到破坏, 出现“频率崩溃”事故。

表 1 汽轮机允许的低频运行时间

Table 1 Allowable operating time of steam turbines under low frequency

频率范围/Hz	允许运行时间/min	
	累计运行	单次运行
48.5~50.5	连续运行	连续运行
48.0~48.5	>300	>5
47.5~48.0	>60	>1
47.0~47.5	>10	>1/3
46.5~47.0	>2	>1/12

低频减载是目前防止上述事故的对策之一, 是维系电网功率平衡、防止电力系统频率和节点电压剧烈下降的有效控制方法。如图 2 所示, 预设 f_1, f_2, \dots, f_n 为低频减载各轮次动作频率值, f_N 为系统额定频率 50 Hz。故障发生前系统频率稳定在额定值 f_N , 在点 1 时系统发生功率缺额, 系统频率下降至 f_1 , 启动第一轮减载, 经过一定的延时切除部分负荷; 但由于系统仍然存在有功功率缺额, 且功率缺额的数值已经减小, 系统频率按曲线 3-4 降低而不是按 3-3' 降低至 f_2 , 启动第二轮减载, 经一定的延时进一步切除部分负荷后, 频率开始沿 5-6 曲线回升, 如此重复, 经过多轮次减载操作后, 频率最后稳定在 $f_{\infty(2)}$ 。UFLS 正是通过这种“逐次逼近”的方法, 迅速及时地算出系统功率缺额, 切除相应数量的负荷, 最终使系统频率稳定在规定的范围之内。

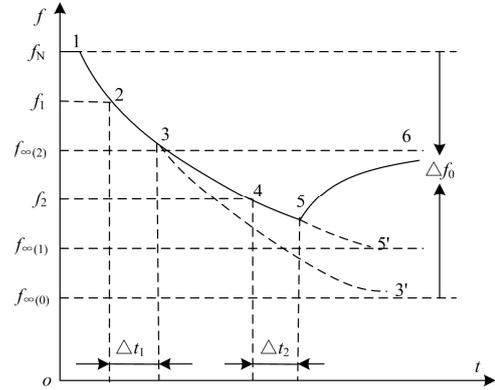


图 2 低频减载过程中频率变化示例图

Fig. 2 Frequency change curves during UFLS

由式(1)可知: ① 电网有功不平衡下电流的幅值与电源电动势及系统总阻抗有关, 一旦网络拓扑确定, 电源电动势及系统阻抗也就随之确定; ② 电流的大小还与系统频率相关, 式(1)中电流余弦函数部分以频率 $(f_M + f_N)/2$ 变化, 正弦函数部分的瞬时值则以频率 $(f_M - f_N)/2$ 周期性地变化。 $(f_M - f_N)/2$ 为电流包络线的频率, 即通常所说的振荡频率; $(f_M + f_N)/2$ 为系统的瞬时频率, 显然, 该处定义的电力系统瞬时频率即为频率的广义定义^[27]。因此由于扰动而突然产生大的有功不平衡情况下, 网络拓扑发生变化的同时, 系统频率因低频减载装置动作也会经历一个过渡过程, 两者共同决定流过输电线路的电流的大小及其动态特性。

1.2 输电线路温度安全分析

当线路电流及所处的气象环境发生变化时, 导线温度也会随之变化, 期间满足暂态热平衡, 如式(2)所示^[28]。

$$mc \frac{dT_c}{dt} = q_s(Q_s) + q_j(i, T_c) - q_c(T_c, T_a, V, \delta) - q_r(T_c, T_a) \quad (2)$$

式中: m 为单位长度导线质量, kg/m; c 为导线的比热容, J/kg·°C, 对于钢芯铝绞线, 取导线的等值比热容; T_c 是导线温度, °C; T_a 为线路所处环境温度, °C; q_s 、 q_j 、 q_c 、 q_r 分别对应单位长度导线的日照发热功率、焦耳热功率、对流散热功率和辐射散热功率, W/m, 相关计算公式见文献[28]; Q_s 为导线所处地区海拔高度上的太阳辐射功率密度, W/m²; i 为流过导线的电流, A; V 和 δ 分别表示风速和风向, m/s, °。

式(2)中焦耳热功率 q_j 为

$$q_j = I^2 R(T_c) \quad (3)$$

式中: I 为电流有效值, A; $R(T_c)$ 为导线温度为 T_c

时的单位长度交流电阻值, Ω/m , 可根据导线 20°C 和 70°C 的交流电阻值通过线性插值得到。

由 1.1 节分析可知, 电网有功不平衡期间电流为一非周期非正弦量, 且在实际电力系统中, 随着频率控制装置的投入, 电流的幅值和变化周期更加多变。因此, 传统的仅采集一个或几个周期电流瞬时值来计算正弦电流有效值的方法, 无法适用于实际电力系统中频率控制装置投入后的导线焦耳热计算。因而从电流有效值的定义出发, 在小时间间隔 Δt 上利用数值积分, 计算有功不平衡期间电流产生的焦耳热, 从而可得当前时间步长上的焦耳热, 即:

$$q_j = (I)^2 R(T_c) = \left(\frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t i^2(t) dt \right) R(T_c) \quad (4)$$

考虑到输电线路运行频率及计算准确性, 取 $\Delta t = 1/f_N = 1/50$ (远小于热惯性时间常数, 导线的热时间常数为几 S 到 10 min 级^[28]); i 为实时采集的输电线路电流瞬时值, 进而可得到当前 Δt 内的温度变化量 ΔT_c , 因此式(2)可写为

$$\Delta T_c = \frac{q_s + q_j - q_c - q_r}{mc} \Delta t \quad (5)$$

根据当前时间间隔的温度变化量 ΔT_c 以及当前时间间隔的初始导线温度(若当前振荡时间间隔为初次计算间隔, 则以导线稳态运行时的稳态温度作为导线初始温度), 可得到当前时间间隔后的导线温度, 它又作为下一计算时间间隔的初始温度, 如此迭代循环, 进而得到导线温升响应曲线, 即

$$T_c = \sum \Delta T_c \quad (6)$$

由 1.1 节分析可知, 输电线路电流受网络拓扑及系统频率影响, 系统有功缺额下, UFLS 装置由频率监测元件触发, 感应于频率而动作, 当系统频率低于触发频率后, 由继电器控制切除预设负荷, 将会改变系统潮流分布, 影响电流形态, 进而影响导线温升响应, 如图 3 所示。

由于表征线路安全运行中的各参数与导线的运行温度均有直接或间接的关系, 因此温度可作为输电线路安全运行评估的关键因素。从线路安全运行的角度, 通常会给导线温度设置两个值, 其一是导线正常或长时间运行时的最高允许温度 T_N , 其二是导线短时过载温度 T_E 。对于钢芯铝绞线来说, 按照 IEEE Std. 738-2012^[29] 和 CIGRE TB 601^[28], 其短时过载温度 T_E 可以取到 100°C , 而其 T_N 通常取为 70°C 或 75°C 。由于我国导线运行最高允许温度(70°C)和线路设计时计算弧垂的导线温度(40°C)并不一致^[30], 因此, 为了保证净空安全距离要求, 需要限制导线温升, 以便线路弧垂不超限。所以, 即使计

及导线设计和安装时的弧垂裕度, 导线温度也不宜超过最高允许温度 T_N 。

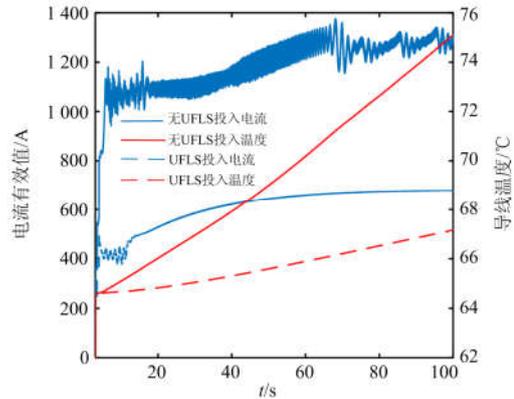


图 3 UFLS 投入对导线电流及温度的影响

Fig. 3 Influence of UFLS on conductor current and temperature

因此, 根据输电线路温升响应将安全级别划分为以下 3 种: 安全级、安全告警级、安全越限级。安全级的温度阈值区间为 $[T_a, T_{\text{alarm}})$ (T_a 为导线所处环境温度, T_{alarm} 取 0.8~0.9 倍 T_N); 安全告警级的温度阈值区间为 $[T_{\text{alarm}}, T_N)$; 安全越限级的温度阈值区间为 $[T_N, +\infty)$ 。根据输电线路的温升响应曲线判断输电线路的安全级别, 并将输电线路当前的安全级别发送给调度系统, 完成有功不平衡期间输电线路温度安全分析。

$$\begin{cases} \text{if } T_a \leq T_c < T_{\text{alarm}}, & \text{安全级} \\ \text{if } T_{\text{alarm}} \leq T_c < T_N, & \text{安全告警级} \\ \text{if } T_c \geq T_N, & \text{安全越限级} \end{cases} \quad (7)$$

2 计及低频减载影响的输电线路过载热保护

2.1 过载热保护原理

在继电保护系统中, 通常以定时限或反时限过电流保护和距离 III 段保护作为输电线路后备保护, 两者均采用电流表示线路过负荷程度, 按躲过最大负荷电流 $I_{L,\text{max}}$ 进行整定。根据整定公式可知定时限过电流保护的動作电流范围一般在 1.82~4.41 倍 $I_{L,\text{max}}$, 距离保护的動作电流范围则一般在 2.07~3.75 倍 $I_{L,\text{max}}$ ^[5], 当保护判据满足时, 继电保护动作于发信或跳闸。

然而实际电力系统中, 过电流保护及距离保护在面对功率不平衡时, 或因电流超过整定值而动作, 或因含闭锁模块而将保护牢牢闭锁, 两者均忽视了系统有功不平衡过程中的电流波动、频率控制措施投入及由此带来的输电线路温升问题。

有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护, 采用电流启动判据避免保护频繁启动,

电流启动判据如式(8)所示。

$$I_c > I_{\text{start}}, I_{\text{start}} = k_1 I_N \quad (8)$$

式中: I_c 为电网发生有功不平衡时经过潮流计算预估的导线电流有效值; k_1 为电流启动系数, $k_1=0.8\sim 0.9$; I_N 为导线额定最大载流量。

为充分挖掘线路耐受事故过负荷的能力, 当 $T_c=T_N$ 即输电线路进入安全越限级时, 采用变化轨迹判据判断系统有功不平衡状态是否正在缓解, 变化轨迹判据如下式所示。

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} \geq 0 \\ \frac{dI}{dt} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

当频率变化率及电流变化率满足式(9)时, 说明系统有功不平衡状态正在缓解, 频率正在恢复且流过输电线路的电流不再波动上升, 保护可不立即动作; 否则说明系统状态正在恶化, 保护应立即动作切除过热线路。

考虑到电流及频率采样误差及输电线路温升计算误差, 引入可靠系数 k_{rel} (可取为 1.05~1.1), 于是当式(9)所示判据满足时, 继续计算输电线路温升响应, 但为保证线路热力安全, 若满足式(10)时, 保护应及时动作切除线路。

$$T_c = k_{\text{rel}} T_N \quad (10)$$

根据上述思想, 电网有功不平衡期间计及低频减载影响的输电线路过载热保护逻辑如图 4 所示。

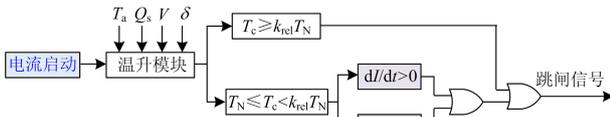


图 4 输电线路过载热保护逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of thermal overload protection for transmission lines

2.2 过载热保护流程

本文所提出的电网有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护包含以下步骤, 保护流程图如图 5 所示。

- 1) 获取导线参数及其所处气象环境参数, 计算稳态热平衡下导线初始稳态温度;
- 2) 电网出现有功不平衡时, 采用式(8)所示判据, 若满足则启动输电线路过载热保护;
- 3) 实时采集输电线路电流、导线所处气象环境参数及各负荷节点频率信息, 在步骤 1) 所得导线初始稳态温度的基础上计算有功不平衡下输电线路温升响应;

4) 根据输电线路实时温升响应按式(7)判断导线所处安全状态, 若导线处于安全状态及安全告警状态时则向调度系统发送安全信号及安全告警信号;

5) 当 $T_c > T_N$ 即输电线路进入安全越限级时, 采用式(9)所示变化轨迹判据, 若满足则继续计算导线温升, 返回步骤 3), 否则保护动作切除线路;

6) 当 T_c 超过过载热保护定值, 即式(10)满足时, 保护直接动作切除过热线路。

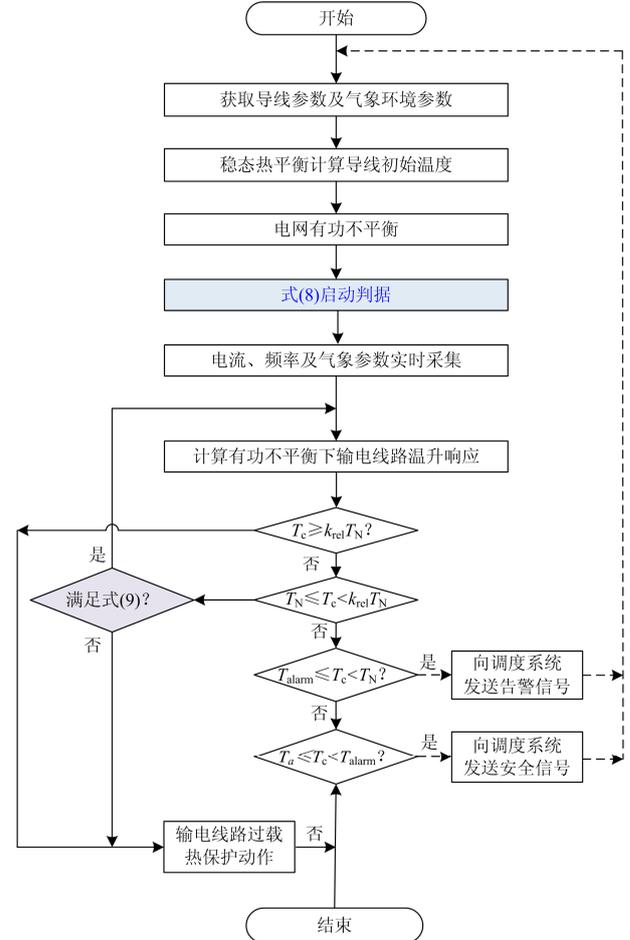


图 5 计及低频减载影响的输电线路过载热保护流程图

Fig. 5 Flow chart of thermal overload protection for transmission lines considering the influence of UFLS

3 算例验证与分析

3.1 算例简介

为验证所提输电线路过载热保护策略的有效性, 本文采用 IEEE10 机 39 节点系统进行算例测试^[31-32]。该系统的电压等级为 345 kV, 包含 43 条输电线路以及 19 个负荷节点, 系统接线图如图 6 所示, 通过对仿真模型设置失去多台机组(切机)、负荷增加以及失去多条线路($N-2$ 以上故障)3 种常见扰动, 引发电力系统有功缺额。

取输电线路过载热保护可靠系数 k_{rel} 为 1.05, 输电线路所用导线型号为 LGJ 400/35, 导线参数见文献[16], 气象参数取夏季高温无风环境参数(温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 风速 0 m/s)。为验证不同低频减载装置投入对保护策略动作特性的影响, 本文采用我国东北和华北地区的低频减载方案^[33], 分别记作方案 I 和方案 II。

将本文所提有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护(动作时间记为 t_p)与文献[12]中的反时限过负荷保护动作信号作对比(动作时间记为 t_{cs})。

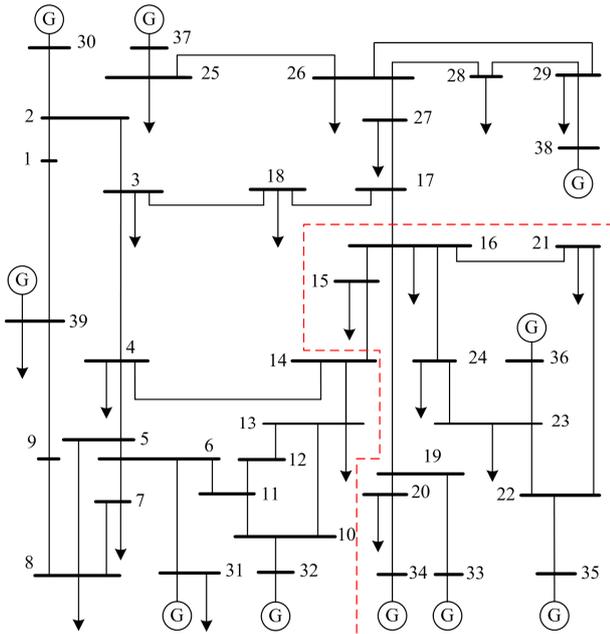


图 6 IEEE10 机 39 节点系统接线图

Fig. 6 Diagram of IEEE10-unit 39-bus power system

3.2 失去多台机组引发有功缺额下的动态特性分析

将所提过载热保护应用于线路 L_{1-39} , 根据线路参数及相应的气象参数, 可得到导线 L_{1-39} 的初始稳态温度为 $62.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分析以下几种因失去多台机组造成的有功缺额情况以及过载热保护的动态特性。

Case1: 在 $t=0\text{ s}$ 时刻, 切除母线 30 和母线 39 上的发电机, 造成系统有功缺额, 无低频减载装置投入;

Case2: 在 $t=0\text{ s}$ 时刻, 切除母线 30 和母线 39 上的发电机, 造成系统有功缺额, 在负荷节点 7 和 8 投入低频减载装置 I;

Case3: 在 $t=0\text{ s}$ 时刻, 切除母线 30 和母线 39 上的发电机, 造成系统有功缺额, 在负荷节点 7 和 8 投入低频减载装置 II;

Case4: 在 $t=0\text{ s}$ 时刻, 切除母线 30 和母线 39

上的发电机, 造成系统有功缺额, 在负荷节点 18, 25—27 共 4 个负荷节点投入低频减载装置 I。

不同情况下的动态响应曲线如图 7 所示, 从左到右依次为: 流过导线 L_{1-39} 的电流有效值、节点 8 频率, 导线 L_{1-39} 的温升响应曲线以及输电线路过载热保护动作特性。4 种情况下的动态响应曲线互为对照, 分析低频减载装置投入与否及不同的减载方案对保护动作特性的影响, 可知:

1) 对比无 UFLS 装置投入 Case1 情况和 UFLS 装置投入的情况 Case2-Case4 下的动态响应曲线可知, UFLS 装置的投入能使频率跌落值更小, 更快地恢复到允许偏移范围之内。UFLS 装置的动作, 流过导线的电流会相应地发生变化, 影响导线温升响应进程。

Case1 情况下, UFLS 未投入之前, 在电流的作用下导线温升在 70 s 时温度达到 T_N , 此时频率正在恢复且流过输电线路的电流不再波动上升, 继续计算导线温升, 在 97 s 时达到过载热保护动作整定值满足式(10), 保护动作切除温升过热的线路; UFLS 装置投入之后, Case2 和 Case3 情况下导线温升相对于 UFLS 未投入之前有所降低, 过载热保护分别于 $t=116\text{ s}$ 和 $t=112\text{ s}$ 时动作, UFLS 投入之后, 保护动作时间分别延后了 19 s 和 15 s ; 但 Case3 情况下过载热保护动作时间比 UFLS 未投入之前保护动作时间提前了 2 s 。

2) 在 Case2 和 Case3 两种情况下, 造成系统有功缺额的条件是一样的, 但是投入的 UFLS 装置的整定方案不同, Case2 情况下, 导线温升于 $t=116\text{ s}$ 达到保护动作整定值, 保护动作, 而 Case3 情况下, 保护动作时间为 $t=112\text{ s}$, 但在 Case3 情况下频率更加平滑地恢复到允许值之内。

3) 在 Case2 和 Case4 两种情况下, 造成系统有功缺额的条件及所投入的低频减载装置是一致的, 但是参与低频减载的负荷节点的位置和数量不同, Case4 情况下, 导线温度于 $t=95\text{ s}$ 达到保护动作整定值, 保护动作切除过热线路, 相较于 Case2 情况, 保护提前 21 s 动作切除过热线路, 虽然 Case4 中参与到低频减载中的负荷节点数量更多, 范围更广, 但在减缓导线温升上, Case2 所采用的低频减载方案更好。

4) 在 4 种不同的情况下, 与文献[12]所提的反时限过负荷保护相比, 本文所提过载热保护动作时间分别延后了 51 s 、 38 s 、 35 s 和 32 s , 在保证线路热力安全的前提下, 更能充分挖掘输电线路耐受事故过负荷的能力。

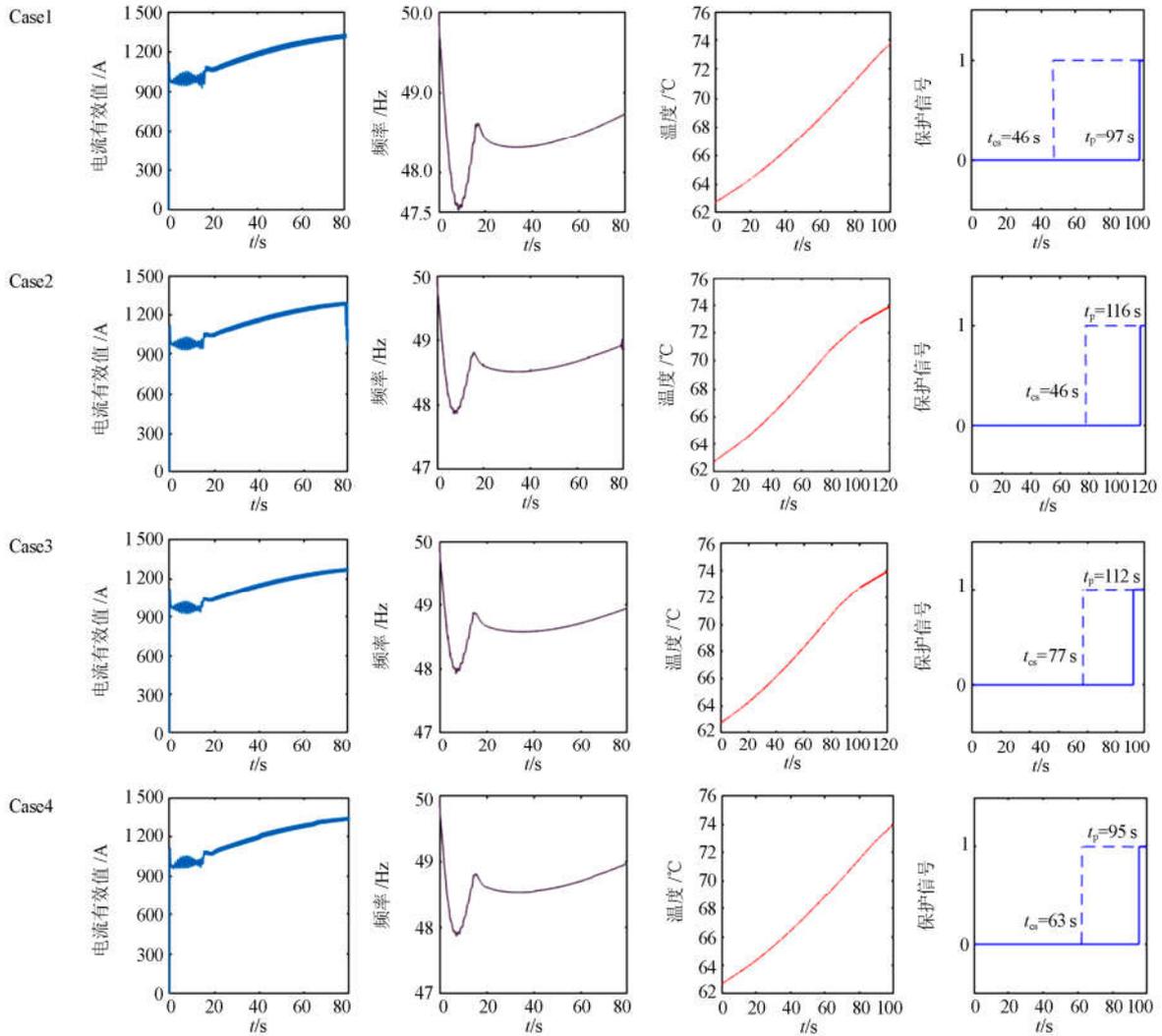


图7 失去机组造成有功缺额下动态响应曲线

Fig. 7 Dynamic response curves under active power imbalance due to loss of generators

3.3 负荷突增引发有功缺额下的动态特性分析

将过载热保护应用于线路 $L_{3,4}$, 按照线路参数及相应的气象参数可得到系统有功不平衡之前导线 $L_{3,4}$ 的初始稳态温度为 64.6°C 。分析以下两种不同情况下因负荷突增造成有功缺额的保护策略动作特性:

Case5: 在 $t=3$ s 时刻, 母线 4 上的负荷增加 1 000 MW, 造成系统有功缺额, 无低频减载装置投入;

Case6: 在 $t=3$ s 时刻, 母线 4 上的负荷增加 1 000 MW, 造成系统有功缺额, 在负荷节点 7 和 8 负荷节点投入低频减载装置 I。

不同情况下的动态响应曲线如图 8 所示, 从左到右依次为: 流过导线 $L_{3,4}$ 的电流有效值、节点 8 频率、导线 $L_{3,4}$ 的温升响应曲线以及输电线路过载保护动作特性, 分析负荷突增造成系统有功缺额

下低频减载装置投入对保护动作特性的影响。

Case5 情况下, UFLS 未投入之前, 在电流的作用下导线温升在 58 s 时温度达到 T_N , 此时频率及流过输电线路的电流均在上下波动, 不满足式(9), 保护立即动作切除温升过热的线路; UFLS 装置投入之后, **Case6** 情况下导线温升相对于 UFLS 未投入之前明显降低, 导线温升在 200 s 时温度达到 T_N , 此时流过输电线路的电流处于稳态, 频率在允许的偏移范围之内, 系统有功缺额状态正在缓解, 继续计算导线温升, 当 $t=336$ s 导线温度达到保护动作整定值, 保护动作切除线路。UFLS 装置投入后保护动作时间延后了 278 s; 两种不同情况下, 相比文献[12]所提的反时限过负荷保护, 本文所提过载保护动作时间分别延后了 24 s 和 245 s, 更能充分挖掘输电线路耐受过负荷的能力。

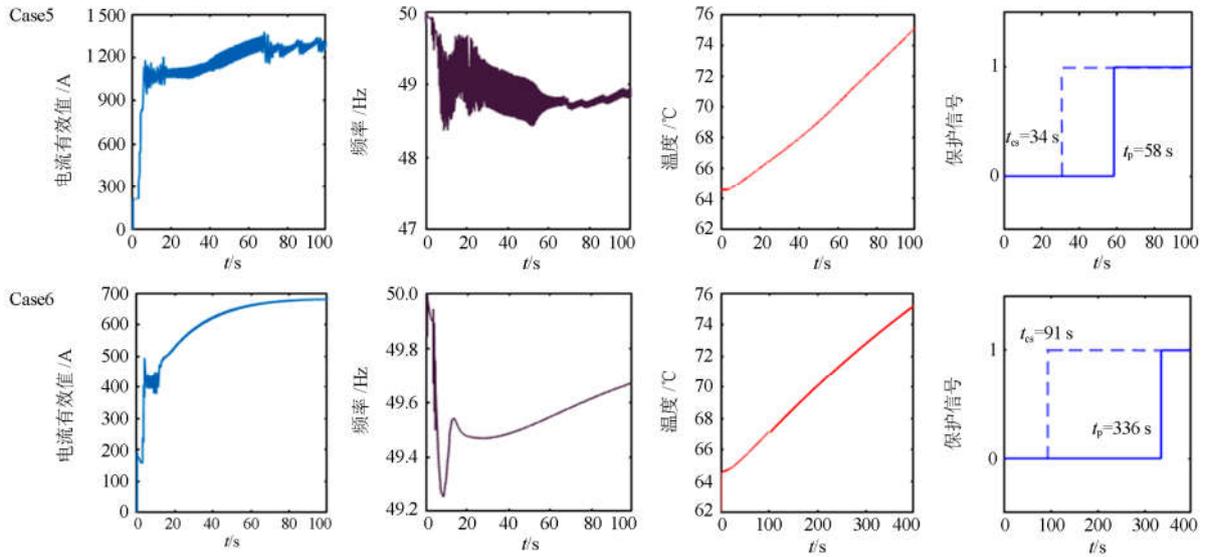


图 8 负荷突增造成有功缺额下动态响应曲线

Fig. 8 Dynamic response curves under active power imbalance due to load surge increase

3.4 失去多条线路引发有功缺额下的动态特性分析

将过载热保护应用于线路 L₁₆₋₁₉, 按照线路参数及相应的气象参数可得到系统有功不平衡之前导线 L₁₆₋₁₉ 的初始稳态温度为 67.9 °C。分析以下两种不同情况下因多条线路故障(此处考虑 N-2)造成有功缺额的保护策略动作特性:

Case7: 在 t=3 s 时刻, 线路 L₁₆₋₁₇ 及 L₁₄₋₁₅ 发生三相短路故障并于 0.1 s 后被切除, 造成图 6 所示虚线右侧区域有功缺额, 无低频减载装置投入;

Case8: 在 t=3 s 时刻, 线路 L₁₆₋₁₇ 及 L₁₄₋₁₅ 发生三相短路故障并于 0.1 s 后被切除, 造成图 6 所示虚线右侧区域有功缺额, 在负荷节点 23 和 24 负荷节点投入低频减载装置 I。

不同情况下的动态响应曲线如图 9 所示, 从左到右依次为: 流过导线 L₁₆₋₁₉ 的电流有效值、节点 23 频率、导线 L₁₆₋₁₉ 的温升响应曲线、以及输电线路过载热保护动作特性, 分析线路故障造成系统有功缺额下低频减载装置投入对保护动作特性的影响。

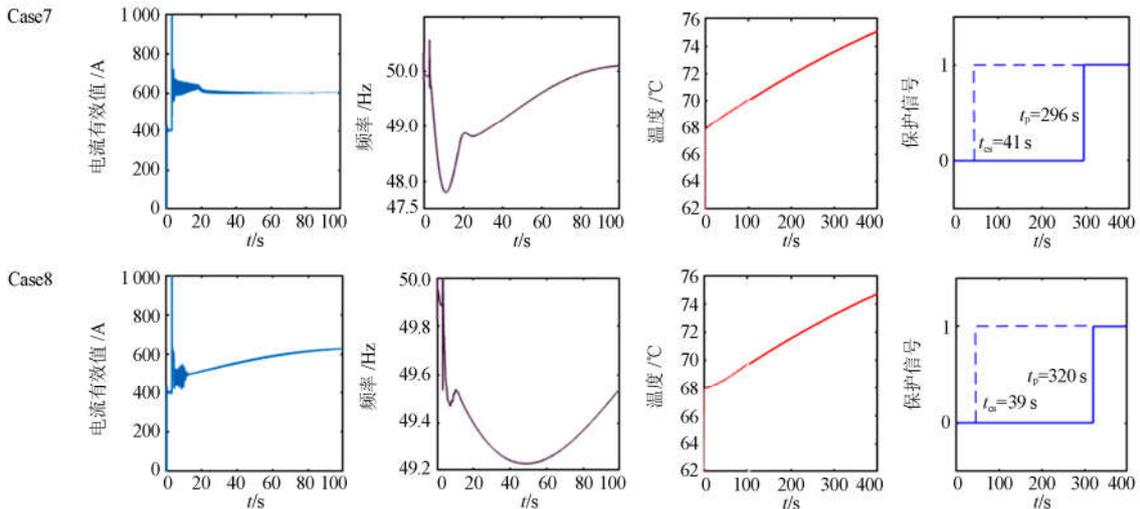


图 9 线路故障造成有功缺额下动态响应曲线

Fig. 9 Dynamic response curves under active power imbalance due to line faults

Case7 情况下, UFLS 未投入之前, 在电流的作用下导线温升在 96 s 时温度达到 T_N , 此时频率及流过输电线路的电流均满足式(9), 继续计算导线温

升, 当 t=296 s 导线温度达到保护动作整定值, 保护动作切除线路; UFLS 装置投入之后, Case8 情况下导线温升相对于 UFLS 未投入之前有所降低, 导

线温升在 120 s 时温度达到 T_N , 此时流过输电线路的电流处于稳态, 频率在允许的偏移范围之内, 系统有功缺额状态正在缓解, 继续计算导线温升, 当 $t=320$ s 导线温度达到保护动作整定值, 保护动作切除线路。UFLS 装置投入后, 保护动作时间延后了 24 s; 两种不同情况下, 相比文献[12]所提的反时限过负荷保护, 本文所提过载热保护动作时间分别延后了 255 s 和 281 s, 更能充分挖掘输电线路耐受过负荷的能力。

相比于现有的反时限过负荷保护, 本文所提的过载热保护在保证线路安全的前提下, 更能充分挖掘输电线路耐受过负荷的能力。对比图 7、图 8 和图 9 所示的动态响应曲线可知: UFLS 装置的投入有助于频率的更快恢复, 降低频率跌落深度, 减缓导线温升响应进程, 当因失去多台机组、负荷突增和失去多条线路引发系统有功缺额时, UFLS 投入之后, 过载热保护动作时间分别延后了 19 s(以 Case1 为基准)、278 s 和 24 s。可见对于失去多台机组、负荷增加及失去多条线路三种常见扰动引起的有功缺额情况下, UFLS 装置的投入在负荷突增情况下对导线的温升响应的影响最明显。

4 结论

本文研究了电网有功不平衡下低频减载的投入对输电线路的温升响应的影响, 提出一种输电线路过载热保护策略, 经过研究, 得出如下结论:

1) 在电网有功不平衡下, 输电线路电流受网络拓扑及系统频率影响, UFLS 装置在有功缺额下感应于频率降低而动作, 影响输电线路电流动态特性, 进而影响输电线路温升响应, 在振荡期间和频率恢复控制过程中, 需关注 UFLS 动作对输电线路温升响应的影响, 关注因事故过负荷而导致的温升问题, 防止导线温度过热点和弧垂越限引起的连锁故障。

2) 优化配置 UFLS 装置的布点位置和数量, 以及合理整定 UFLS 的动作方案, 在快速恢复系统频率的同时, 有助于缓解导线温升程度, 为系统校正控制赢得更多时间; 不同类型的大扰动下, UFLS 装置的投入对减缓导线温升响应及延迟保护动作时间的效果是不一样的, 对负荷突增引发的有功缺额效果最明显。

3) 本文所提输电线路过载热保护策略, 在兼顾系统安全的同时, 能充分挖掘线路耐受过负荷的能力, 避免输电线路因事故过负荷而温升越限, 防止系统恢复过程中出现新的连锁故障。基于所提的过载热保护策略, 如何利用输电线路耐受过负荷的能力优化低频减载控制将是后续的重要研究内容。

参考文献

- [1] 中国国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical guide for electric power system security and stability control: GB/T 26399—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [2] 国家能源局. 电力系统自动低频减负荷技术规定: DL/T 428—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
National Energy Administration. Technical rules for power system automatic under-frequency load shedding: DL/T 428—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [3] RAO K U, BHAT S H, GANESHPRASAD G G, et al. A novel grading scheme for loads to optimize load shedding using genetic algorithm in a Smart Grid environment[C] // 2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), November 10-13, 2013, Bangalore, India.
- [4] 吴云亮, 李晓珺, 唐晓骏, 等. 基于减载贡献因子的低频减载动态优化方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 105-109.
WU Yunliang, LI Xiaojun, TANG Xiaojun, et al. Dynamic optimization of under-frequency load shedding strategy based on load shedding contribution factor[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 105-109.
- [5] 邓炼兴, 巩俊强, 姜云峰, 等. 智能电网继电保护定值在线比对和固化系统[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(4): 36-41.
DENG Lianxing, GONG Junqiang, JIANG Yunfeng, et al. On-line comparison and curing system for relay protection settings of smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(4): 36-41.
- [6] 沈军, 张洪喜, 王忠, 等. 一起距离保护误动作事例分析及解决方案[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 100-104.
SHEN Jun, ZHANG Hongxi, WANG Zhong, et al. Analysis of a case of distance protection mal-operation and solution[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 100-104.
- [7] 曹润彬, 董新洲, 何世恩. 事故过负荷情况下距离保护的動作行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3314-3323.
CAO Runbin, DONG Xinzhou, HE Shi'en. Analysis on performance of zone-III distance protection under post-fault overload[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3314-3323.
- [8] 朱声石, 崔柳, 董新洲. 不受电力系统振荡影响的距

- 离保护[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1175-1182.
ZHU Shengshi, CUI Liu, DONG Xinzhou. Distance protection insensitive to power system oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1175-1182.
- [9] 黄少锋, 赵远, 申洪明, 等. 一种基于功角计算的振荡闭锁方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 87-91, 126.
HUANG Shaofeng, ZHAO Yuan, SHEN Hongming, et al. A scheme for swing blocking based on calculation of power angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 87-91, 126.
- [10] 申洪明, 黄少锋, 费彬. 交直流互联系统对距离保护动作特性的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 58-63, 82.
SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, FEI Bin. Effect analysis of AC/DC interconnected network on distance protection performance and countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 58-63, 82.
- [11] 董希建, 杨海, 刘平, 等. 电力系统事故过负荷的识别及紧急控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 165-169.
DONG Xijian, YANG Hai, LIU Ping, et al. Criterion of accident overload and emergency control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 165-169.
- [12] 周泽昕, 王兴国, 杜丁香, 等. 过负荷状态下保护与稳定控制协调策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 146-153, 22.
ZHOU Zexin, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. A coordination strategy between relay protection and stability control under overload conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 146-153, 22.
- [13] 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.
- [14] CIGRE WG B2.36. Guide for application of direct real-time monitoring systems[R]. CIGRE, Paris, 2012.
- [15] 冯凯, 应展烽, 陈泓, 等. 计及线路热惯性效应的模型预测控制安全经济调度模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1875-1883.
FENG Kai, YING Zhanfeng, CHEN Xiong, et al. Model predictive control security economic dispatch model considering transmission line thermal inertia effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1875-1883.
- [16] 王建, 熊小伏, 陈璟, 等. 振荡电流作用下的架空线路温升响应计算[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2416-2422.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, CHEN Jing, et al. Temperature rise response calculation of overhead conductor under power oscillation current[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2416-2422.
- [17] 艾红杰, 方扬, 陈大鹏, 等. 晋北-南京特高压直流输电工程安稳系统及其控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 118-125.
AI Hongjie, FANG Yang, CHEN Dapeng, et al. Study on stability and control strategy in Jinbei-Nanjing HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 118-125.
- [18] 代仕勇, 彭晓涛, 朱利鹏, 等. 基于负荷波动特性的联络线随机功率波动幅值估计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 29-33, 51.
DAI Shiyong, PENG Xiaotao, ZHU Lipeng, et al. Amplitude estimation for tie-line stochastic power fluctuation based on load fluctuation characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 29-33, 51.
- [19] 易俊, 屠竞哲, 徐式蕴, 等. 功率重复冲击下两区域交流联络线功率波动机制及幅值计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 52-58.
YI Jun, TU Jingzhe, XU Shiyun, et al. AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value estimation after repeated power impacts in two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 52-58.
- [20] 郑超, 苗田. 交流薄弱断面中关键支路动态识别及稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5429-5436.
ZHENG Chao, MIAO Tian. Study on the dynamic identification method for key branch of AC weak section and stability control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5429-5436.
- [21] 郝梦竹, 王青, 李文启, 等. 不同直流闭锁故障对弱交流联络线功率波动影响机制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 88-94.
HAO Mengzhu, WANG Qing, LI Wenqi, et al. Power fluctuation influence mechanism of weak AC tie-line caused by different DC block[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 88-94.
- [22] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [23] 程含渺, 李红斌, 邵周策, 等. 考虑多种影响因素的电网频率概率分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 9-15.
CHENG Hanmiao, LI Hongbin, SHAO Zhouce, et al.

- Research on distribution of power frequency considering on multiple influence factors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 9-15.
- [24] XIE Y, ZHANG H, LI C, et al. Development approach of a programmable and open software package for power system frequency response calculation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 189-198. DOI: 10.1186/s41601-017-0045-1.
- [25] 陈桥平, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 互联电网的地区频率特性差异性及其对低频减载的影响研究[J]. 中国电力, 2009, 42(8): 1-5.
CHEN Qiaoping, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. Study on difference of regional frequency characteristics of interconnected power system and its influence on under-frequency load shedding[J]. Electric Power, 2009, 42(8): 1-5.
- [26] 中国国家标准化管理委员会. 电网运行准则: GB/T 31464—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Standardization Administration of the People's Republic of China. The grid operation code: GB/T 31464—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [27] 许庆强, 索南加乐, 宋国兵, 等. 振荡时电力系统瞬时频率的实时测量[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 52-55, 70.
XU Qingqiang, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Real-time measurement of power system instants frequency while power system swings[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 52-55, 70.
- [28] CIGRE Working Group B2.43. Guide for thermal rating calculation of overhead lines[R]. Paris, France: CIGRE, 2014.
- [29] IEEE Power and Energy Society. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors: IEEE Std. 738—2012[S]. New York, USA: IEEE, 2012.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line: GB 50545—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [31] ZUO Y, SOSSAN F, BOZORG M, et al. Dispatch and primary frequency control with electrochemical storage: a system-wise verification[EB/OL]. [2018-06-15]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1806/1806.05825.pdf>.
- [32] CIGRE WG C4.503. Power system test cases for EMT-type simulation studies[R]. Paris, France: CIGRE, 2018.
- [33] 张慧颖. 智能化低频低压减载模型及其敏感性分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
ZHANG Huiying. Study of intelligent under frequency and under voltage load shedding modeling and its sensitivity analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-02-16

作者简介:

陈璟(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: chenjingyn@foxmail.com

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;

胡剑(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 葛艳娜)