

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210814

考虑输电线路动态热特性的自适应过负荷保护方法

欧阳金鑫¹, 余建峰¹, 龙晓轩²

(1. 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;

2. 国网重庆市电力公司信息通信分公司, 重庆 401121)

摘要: 随着电力系统规模不断扩大、电网互联和复杂程度不断提高, 线路过负荷导致的过载主导型连锁故障风险日趋增大。现有研究未计及过负荷线路功率的动态变化, 缺乏对线路允许过负荷时间的动态刻画, 可能导致因线路过快切除而引发连锁故障或因延迟切除而造成线路损坏。针对过负荷线路功率变化引起的动态热特性, 分析了过负荷线路温升速度的影响因素, 解析了线路允许过负荷时间的动态特征, 进而提出了基于线路功率监测预估动态允许过负荷时间的自适应过负荷保护思想。通过建立线路动态热平衡方程, 提出了预估线路动态允许过负荷时间的计算方法, 从而提出了基于动态允许过负荷时间的自适应过负荷保护方法。仿真算例表明, 该方法充分考虑了过负荷线路功率变化下的动态温升过程, 能够在保证线路安全的前提下, 最大限度地延缓线路的切除, 有效降低连锁故障的风险。

关键词: 线路过负荷; 负荷保护; 线路热特性; 允许过负荷时间; 连锁故障

Adaptive overload protection method considering the dynamic thermal characteristics of a transmission line

OUYANG Jinxin¹, YU Jianfeng¹, LONG Xiaoxuan²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China;

2. Information and Communication Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401121, China)

Abstract: As the scale of power systems expands and the interconnection extent and complexity of the power grid increase, the risk of overload-dominated cascading failures caused by line overload is increasing. Existing research does not take into account the dynamic changes of overload line flows, and lacks dynamic descriptions of the allowable overload time. This may lead to cascading failures due to too quickly cut or line damage due to delayed cut. In view of the dynamic thermal characteristics caused by a power change of the overloaded line, analyzing the influencing factors of temperature rise speed of the overload line, and the dynamic characteristics of line allowable overload time, an adaptive overload protection idea based on line flow monitoring estimated dynamic allowable overload time is proposed. Through establishing a line dynamic thermal balance equation, a calculation method of estimated dynamic allowable overload time is proposed. Then an adaptive overload protection method based on dynamic allowable overload time is proposed. The case study shows that the method fully considers the dynamic temperature rise process under a power variation of the overload line. It also delays the line removal time to the greatest extent and effectively reduces the risk of cascading failure thus helping to ensure the security of the line.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: line overload; overload protection; line thermal characteristics; allowable overload time; cascading failure

0 引言

输电线路电流超过允许长期运行电流将导致线

路过负荷。在现代电力系统中, 受设备老化、恶劣气候、大负荷运行方式等因素影响, 单一故障元件停运造成的潮流转移易导致正常运行的线路演变为过负荷状态。过负荷后, 线路电流大于过负荷保护整定值, 将引起保护动作切除线路^[1-3]。保护动作导致电网拓扑变化, 造成潮流进一步转移, 易引发更

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600);
国家自然科学基金面上项目资助(51877018)

大范围的连锁跳闸, 导致连锁故障的发生, 造成巨大社会经济损失^[4-7]。线路过负荷已成为引发电力系统大面积停电的主要原因^[8-9]。

改进保护原理和整定方法来避免线路过负荷期间保护的動作, 是阻止线路过负荷引发连锁跳闸最直接的方法^[10-14]。文献[10]定义了潮流转移区域, 进而基于图论, 给出了潮流转移区域的搜索方法以及自适应调整策略的保护方法。文献[11]改进了相间距离保护Ⅲ段元件来防止保护误动。文献[12]以补偿电压作为动作量, 通过选择极化量作为参考量在电压平面上构造动作区域来防止距离保护误动。文献[13]引入潮流转移特征量的概念, 提出了在过负荷期间闭锁保护的方法。文献[14]建立了保护元件动作概率模型, 根据误动概率闭锁保护。但是, 线路过负荷期间的发热功率大于散热功率, 由于线路过负荷仍然存在, 线路温度持续升高, 保护的闭锁可能引起线路温度超过最大允许温度, 使得弧垂加大而引发短路故障, 或因热氧化而导致线路损坏, 造成严重的安全问题。此外, 保护闭锁后若再发生故障可能难以可靠切除, 给整个系统带来了较大安全风险^[15-16]。

由于输电线路的热惯性, 过负荷发生后, 线路温度一般以较慢速度连续变化, 线路过负荷一定时间后温度才超过最大允许温度^[17-18]。过负荷线路温度达到最大允许温度的时间被称为允许过负荷时间。线路过负荷后, 通常通过电源功率调节、元件投切来改变系统潮流分布, 从而恢复过负荷线路^[19-20]。若能够在允许过负荷时间内恢复线路功率, 即可避免温度越限, 从而避免线路切除引发的连锁故障。目前, 电流和距离Ⅲ段保护动作时间的整定通常依赖于运行经验, 取值较为保守, 由此导致的线路过快切除是诱发连锁故障的关键因素。因此, 在线路安全范围内延缓保护动作时间, 为过负荷的调控提供充足条件, 是避免连锁故障最有效的方式。文献[21]提出通过对温度的监测来决策过负荷线路的切除。但是, 线路测量的温度主要为表层温度, 监测误差较大, 加之线路温升具有显著的滞后性, 易导致保护不能及时动作, 温度监测的实用性较为有限。如果根据实时功率采样对允许过负荷时间进行计算, 由于采样间隔内功率存在变化, 因此无法准确计算线路温度, 导致计算所得允许过负荷时间存在较大误差, 仍然无法保证保护的正确动作。

准确辨识允许过负荷时间是兼顾设备安全和防止连锁故障的有效途径。由于线路过负荷期间环境温度的变化很小, 因此线路允许过负荷时间主要决定于线路参数与功率^[22]。文献[23]提出可以根

据线路功率和环境温度计算允许过负荷时间。文献[21]计算了不同线路功率下的允许过负荷时间, 论证了功率对允许过负荷时间的影响。但是, 二者的计算均是基于恒定的过负荷功率。在线路过负荷期间, 电网拓扑以及电源出力等的调整使得电网功率分布与大小不断变化, 将改变过负荷线路温升的速度, 利用恒定功率计算的允许过负荷时间同样存在较大误差, 可能导致因线路过快切除而引发连锁故障, 或可能因延迟切除而造成线路损坏。若利用实时电流的采样来计算允许过负荷时间, 但实质上仍是将各采样间隔的功率视为恒定, 因此并不能准确计算线路温度, 导致允许过负荷时间存在较大误差。充分考虑过负荷线路功率的动态变化来确定保护的動作时间, 是保障设备和系统安全的关键。

针对线路允许过负荷时间的动态变化现象, 提出了一种线路自适应过负荷保护方法。首先, 分析了过负荷线路的动态热特性, 以及过负荷线路温升速度的影响因素; 然后, 提出了基于线路功率监测预估动态允许过负荷时间的思想, 进而提出了基于动态允许过负荷时间的线路过负荷保护方法; 通过建立线路动态热平衡方程, 提出了预估线路动态允许过负荷时间的计算方法, 以及自适应过负荷保护的整定计算方法和实现方案, 最后通过算例验证了理论分析和保护方法的正确性。所提方法考虑了过负荷线路功率的动态变化对温升的影响, 能够在保证过负荷线路安全的前提下, 尽可能降低连锁故障的风险。

1 过负荷线路动态热特性

输电线路在运行过程中, 由于电流的热效应以及输电线路与周围环境存在温度差, 输电线路中存在发热功率以及散热功率。输电线路的散热主要包括线路与周围空气之间的对流散热以及向周围环境的辐射散热 2 种方式。输电线路的温度主要由发热功率和散热功率决定^[24], 其热平衡方程为

$$m_L c_L \frac{dT_c}{dt} = P_h - P_c - P_r \quad (1)$$

式中: m_L 为导线质量, $m_L = \pi v_L r_L^2 l_L$, 其中, v_L 、 r_L 、 l_L 分别为线路的密度、半径、长度; c_L 为线路比热容; T_c 为导线的绝对温度; P_h 为线路上由电流热效应产生的热量; P_c 、 P_r 分别为对流散热和辐射散热功率。

对流散热和辐射散热分别满足式(2)和式(3)。

$$P_c = 2\pi r_L l_L M_L (T_c - T_a) \quad (2)$$

$$P_r = 2\pi r_L l_L N_L (T_c^4 - T_a^4) \quad (3)$$

式中： M_L 、 N_L 分别为对流散热系数和辐射散热系数； T_a 为环境的绝对温度。

输电线路发热功率主要为电流热效应产生的功率。因此，发热功率与输电线路输送的功率之间满足式(4)。

$$P_h = \frac{P_L^2 + Q_L^2}{U_L^2} \rho_L \frac{l_L}{\pi r_L^2} \quad (4)$$

式中： P_L 、 Q_L 、 U_L 分别为线路的有功、无功以及电压； ρ_L 为线路的电阻率。

输电线路功率稳定时，散热功率与发热功率相等，因此线路温度保持恒定。但是，当电力系统因运行方式调整、故障等原因造成线路功率变换时，线路温度随之改变。当线路电流超过其长期允许电流时，线路出现过负荷。由式(2)、式(3)可见，输电线路对流散热和辐射散热的功率取决于线路参数以及绝对温度与环境绝对温度之差。线路参数不变，而环境温度变化的时间尺度远远大于线路过负荷时间，因此在线路过负荷期间环境温度可近似不变，即输电线路的散热功率变化较小。但是，过负荷发生后，线路功率的增加使得线路发热功率大幅增大，由于散热功率变化较小，因为过负荷造成线路温度持续升高。

过负荷后，若线路温度超过最大允许温度，将造成线路损坏。因此，利用继电保护装置在允许过负荷时间内切除过负荷线路是避免线路损坏的必要措施。但是，线路过负荷后，受电网功率再分布或电源功率调节的影响，线路功率不断变化^[24]，势必使得线路温升的速度随之改变。因此，线路允许过负荷时间受线路功率变化的影响而具有动态性，而不是通常认为的恒定值。若利用过负荷瞬间的线路初始功率确定允许过负荷时间必然产生误差，可能造成过负荷线路切除过慢而造成设备损坏或造成切除过快而引发连锁故障。

2 线路自适应过负荷保护原理

在动态允许过负荷时间内切除线路可保证线路安全。但是，动态允许过负荷时间与线路功率变化相关，而线路功率变化速度由整个系统在过负荷后的响应特性以及控制策略决定，难以在整个过负荷期间准确获取。过负荷后线路功率的变化主要由电力系统元件的投切和同步发电机以及新能源等电源功率调节产生^[25]。元件投切造成线路功率突变；新能源响应速度很快，一般能够在数毫秒内调节输出功率，其功率变化也可近似为瞬时变化^[26]，而同步发电机受滑坡和爬坡速度限制，功率仅能线性变

化，因此在任一较小时间间隔内，线路功率可近似为线性变化。因此，在任一时间间隔内，通过测量线路功率的变化量，即可近似计算线路功率变化速度，从而预估动态允许过负荷时间并实施更为精准的过负荷保护。

基于预估动态过负荷时间的自适应保护原理如图1所示。过负荷发生后，保护启动并每隔一定时间间隔 Δt 测量过负荷线路的功率。若某一采样时刻的功率小于长期运行允许功率，则表明过负荷线路的功率已恢复正常，线路温度将随之降低，过负荷保护返回。否则，根据线路预估动态允许过负荷时间整定过负荷保护的動作时间。首先根据采样间隔的功率变化量计算过负荷线路功率变化速度；进而利用过负荷线路功率变化速度和采样时刻的功率计算该采样间隔内的预估动态允许过负荷时间。若任意第 k 次采样的预估动态过负荷时间 \tilde{t}_{ak} 大于下一次采样时刻与过负荷时间之差 $(k+1)\Delta t$ ，则表明在当前功率变化速度下第 $k+1$ 次采样前线路温度仍小于最大允许温度，直至第 $k+1$ 次采样线路都无需退出运行，应闭锁过负荷保护；若 $\tilde{t}_{ak} \leq (k+1)\Delta t$ ，表明在第 $k+1$ 次采样前线路就可能因过热而损坏，应在 \tilde{t}_{ak} 时间内切除过负荷线路。

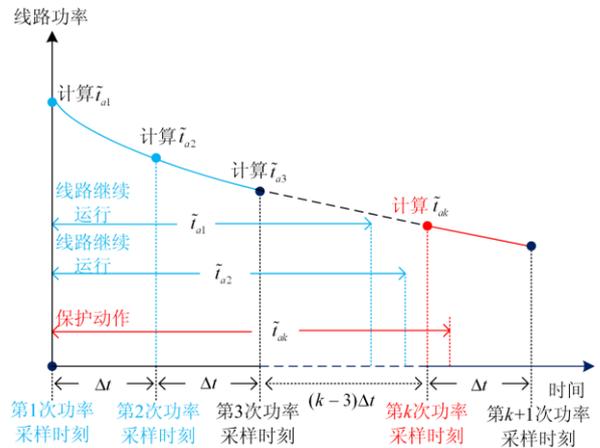


图1 自适应过负荷保护原理

Fig. 1 Principle of adaptive overload protection

如图1所示，过负荷发生后，过负荷保护启动，由第1次采样功率与初始过负荷功率之差可计算预估动态过负荷时间 \tilde{t}_{a1} ，由于 $\tilde{t}_{a1} > \Delta t$ ，因此 $t \leq \Delta t$ 时间内闭锁过负荷保护；随后，在每个采样时刻依次计算预估动态允许过负荷时间并与采样时间比较；由于第 i 次采样的预估动态过负荷时间 $\tilde{t}_{ai} \leq (i+1)\Delta t$ ，为避免线路损坏，第 i 个采样时刻整定的过负荷保护动作时间应小于等于 \tilde{t}_{ai} 。因此，

在任意第 k 个采样时刻, 过负荷保护的動作时间整定为

$$t_{\text{op},k} = \begin{cases} K_{\text{rel}} \tilde{t}_{ak}, & \tilde{t}_{ak} \leq (k+1)\Delta t \\ \infty, & \tilde{t}_{ak} > (k+1)\Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中: \tilde{t}_{ak} 为第 k 个采样时刻的预估动态过负荷时间; K_{rel} 为可靠性系数。

由于过负荷保护動作时间应当不大于 \tilde{t}_{ai} , 并且第 k 个采样时刻计算得到的動作时间应大于该采样时刻的时间, 因此, K_{rel} 应满足:

$$\begin{cases} K_{\text{rel}} \leq 1 \\ K_{\text{rel}} > k\Delta t / \tilde{t}_{ak} \end{cases} \quad (6)$$

电网能够通过可控源荷的功率控制调节过负荷线路功率, 使其逐步恢复至正常功率。在电网调节作用下过负荷后的线路功率持续降低, 线路功率的变化速度取决于电网控制策略。如果忽略该采样间隔内线路功率变化对线路温升的影响, 可能导致计算得到的温度存在较大误差, 导致过负荷保护过早或者未及时动作。而通过持续的功率采样计算动态允许过负荷时间, 计及了功率动态变化对线路温升的影响, 能够确保过负荷保护实时跟踪线路温度的变化, 兼顾了线路安全和线路切除对电力系统的影响。

3 线路自适应过负荷保护的实现

3.1 整定方法

将式(2)—式(4)代入式(1), 可以得到过负荷线路实时功率决定的热平衡方程。

$$\pi v_L r_L^2 l_L c_L \frac{dT_c}{dt} = \frac{P_L^2 + Q_L^2}{U_L^2} \rho_L \frac{l_L}{\pi r_L^2} - 2\pi r_L l_L M_L (T_c - T_a) - 2\pi r_L l_L N_L (T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)(T_c - T_a) \quad (7)$$

电力系统无功功率通常采用就地平衡的补偿方式, 过负荷后线路无功功率的变化较小。同时, 线路过负荷主要发生在输电网中, 由于输电网电阻很小, 因此线路有功功率的变化对电压的影响较小。因此, 过负荷线路的无功功率和电压可近似恒定。此外, 由于线路温度与环境温度相差较小^[22], 因此将式(7)中的 $(T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)$ 近似为 $4T_a^3$ 。由于导线温度通常高于环境温度, 因此该近似处理使得所计算的辐射散热功率减小, 产生一定允许过负荷时间的安全裕度。但是, 导线辐射散热占总散热在 10% 以内^[22]。即使按照导线通常的最大允许温度 343 K 计算, 近似后总散热功率误差也小于 1.8%。

因此, 在第 k 个采样间隔 Δt , 由式(7)可得在考虑过负荷线路功率变化下的热平衡动态方程为

$$\frac{d(T_c - T_a)}{dt} + \frac{K_3}{K_1} (T_c - T_a) = \frac{K_2}{K_1} (P_{Lk} - v_{pk} t_k)^2 + \frac{K_0}{K_1} \quad (8)$$

式中: $K_0 = \rho_L Q_{L0}^2 / \pi U_{L0}^2 r_L^2$; $K_1 = \pi v_L r_L^2 c_L$; $K_2 = \rho_L / \pi U_{L0}^2 r_L^2$; $K_3 = 2\pi r_L M_L + 8\pi r_L N_L T_a^3$; $t_k = t - k\Delta t$; Q_{L0} 、 U_{L0} 为发生过负荷的时刻过负荷线路的无功以及电压; P_{Lk} 为第 k 次采样测得的线路功率; v_{pk} 为第 $k-1$ 个采样间隔的功率变化速度, 可由式(9)进行计算。

$$v_{pk} = \frac{P_{Lk} - P_{L(k-1)}}{\Delta t} \quad (9)$$

式中, $P_{L(k-1)}$ 为第 $k-1$ 次采样测得的线路功率。

对式(8)进行求解, 可以得到 t_k 时刻线路温度的估计值为

$$T_{ctk} = B_1 v_{pk}^2 t_k^2 - (2B_2 v_{pk}^2 + 2B_1 v_{pk} P_{Lk}) t_k + C_k e^{-B_4 t_k} + B_1 P_{Lk}^2 + 2B_3 v_{pk}^2 + 2B_2 v_{pk} P_{Lk} + T_a + \frac{K_0}{K_3} \quad (10)$$

式中, $B_1 = K_2 / K_3$, $B_2 = K_2 K_1 / K_3^2$, $B_3 = K_2 K_1^2 / K_3^3$, $B_4 = K_3 / K_1$, C_k 可由第 $k-1$ 次采样时的线路温度估计值 $T_{c(k-1)}$ 计算。

$$C_k = T_{c(k-1)} - T_a - B_1 P_{Lk}^2 - 2B_3 v_{pk}^2 - 2B_2 v_{pk} P_{Lk} - \frac{K_0}{K_3} \quad (11)$$

对 $e^{-B_4 t}$ 项进行泰勒展开, 其中常数项、一次项和二次项的占比为

$$\delta(t) = \frac{C_k - B_4 C_k t + \frac{1}{2} B_4^2 C_k t^2}{C_k e^{-B_4 t}} \quad (12)$$

线路过负荷需要在几分钟内恢复, 以保证线路安全。因此在常用输电线路参数下, 式(12)的 $\delta(t)$ 大于 0.98。因此, 忽略 $e^{-B_4 t}$ 泰勒展开式的 $o(t^2)$ 项, 式(10)变为与时间有关的上抛物线函数。根据上抛物线函数的特征, 线路温度上升至最高允许温度的时间即为预估动态允许过负荷时间 \tilde{t}_{ak} 。根据上抛物线函数求根公式, 可得线路温度达到最大允许温度时的预估时间为

$$\tilde{t}_{ak} = \frac{2B_2 v_{pk}^2 + 2B_1 v_{pk} P_{Lk} + B_4 C_k - \sqrt{\xi_k}}{2 \left(B_1 v_{pk}^2 + \frac{1}{2} B_4^2 C_k \right)} + k\Delta t \quad (13)$$

式中, ξ_k 的值为

$$\xi_k = \left[2B_2 v_{pk}^2 + 2B_1 v_{pk} P_{Lk} + B_4 C_k \right]^2 - 4 \left[B_1 v_{pk}^2 + \frac{1}{2} B_4 C_k \right] (T_{ck} - T_{c,max}) \quad (14)$$

式中: T_{ck} 为第 k 次采样时的线路温度估计值; $T_{c,max}$ 为线路最大耐受温度。

由式(13)可见, 预估动态允许过负荷时间与线路最大耐受温度、初始过负荷功率以及线路功率变化速度有关。线路最大耐受温度取决于导线材质, 初始过负荷功率保持不变, 允许过负荷时间随着线路功率的变化而具有动态性。根据式(10)以及式(13), 通过采样时刻功率和线路温度估计值, 即可求得线路预估动态过负荷时间以及下次采样时刻的温度估计值。其中, 功率可通过采样获得, 每个采样时刻的线路温度估计值可由上一次采用时刻的功率计算。由于线路温度无法跳变, 因此过负荷瞬间线路温度与正常运行时的温度相近。因此, 初始过负荷时刻的温度可以通过监测获得, 但为了避免增加保护的复杂程度, 初始时刻温度也可由功率计算。将过负荷前的线路功率代入式(8), 并令式(8)左侧为 0, 可得过负荷发生时的线路温度估计值为

$$T_{c0} = \frac{K_2 P_{Lr}^2 + K_0}{K_3} + T_a \quad (15)$$

式中, P_{Lr} 为线路正常运行时的功率。

由于初始过负荷时刻未进行采样, 无法得到过负荷线路功率变化速度, 而第 1 个采样时刻与初始过负荷时刻接近, 功率变化速度变化较小, 因此将 v_{p1} 代入式(10)计算第 1 个采样时刻温度估计值。

$$T_{c1} = B_1 v_{p1}^2 \Delta t^2 - (2B_2 v_{p1}^2 + 2B_1 v_{p1} P_{L0}) \Delta t + C_0 e^{-B_4 \Delta t} + B_1 P_{L0}^2 + 2B_3 v_{p1}^2 + 2B_2 v_{p1} P_{L0} + T_a + \frac{K_0}{K_3} \quad (16)$$

式中, P_{L0} 为过负荷发生时刻的线路功率。

3.2 保护方案

考虑输电线路动态热特性的自适应过负荷保护动作逻辑如图 2 所示。当检测到电力系统中有输电线路功率大于允许长期运行功率时, 过负荷保护启动。随后, 每隔 Δt 时间对过负荷线路功率进行采样。如果采样时刻过负荷功率小于允许长期运行功率, 说明过负荷线路功率已经恢复正常, 此时过负荷保护返回。如果采样时刻过负荷功率大于允许长期运行功率, 则根据式(9), 计算过负荷线路功率变化速度 v_{pk} ; 然后, 将 v_{pk} 代入式(13), 计算预估动态允许过负荷时间 \tilde{t}_{ok} ; 若预估允许过负荷时间满足式(5)

中一式, 此时保护动作, 将过负荷线路切除; 若预估允许过负荷时间满足式(5)中二式, 此时保护不动作, 过负荷线路继续保持运行, 同时根据式(10), 计算下次功率采样时过负荷线路的温度估计值。

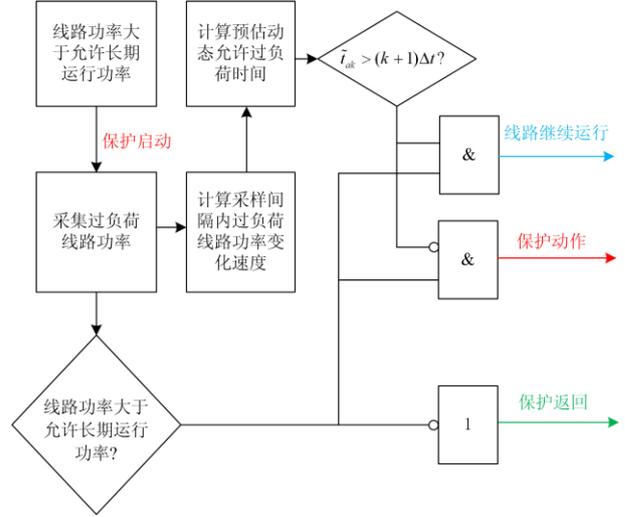


图 2 保护逻辑图

Fig. 2 Protection logic diagram

4 算例分析

本节采用 IEEE30 系统验证所提线路保护方法的正确性。系统结构如图 3 所示。其中, 节点 1、2、13、22、23、27 接有同步发电机(SG), 容量分别为 45 MVA、50 MVA、40 MVA、60 MVA、30 MVA、40 MVA。线路 L_{6-10} 的长期运行允许功率为 8.4 MW, 最大耐受温度为 70 °C, 线路功率采样间隔为 0.5 min。电力系统正常运行时, 各节点同步发电机的功率分别为 26.37 MW、9.68 MW、23 MW、11.59 MW、19.2 MW、26.91 MW, 线路 L_{6-10} 的功率为 7.03 MW。根据式(15), 电力系统正常运行时线路 L_{6-10} 的温度为 48.13 °C。保护可靠系数 K_{rel} 取 0.9。另外比较本文所提的方法与现有固定动作时间的过负荷保护方法以验证其有效性, 固定动作时间采用文献[27]所采用的 5 min。过负荷发生后, 各节点 SG 按照预设的控制策略(如图 4 所示, 简称策略 1), 对 SG 输出功率进行控制, 以调节系统潮流, 避免连锁故障发生。

在 $t=0$ 时刻, 线路 L_{6-9} 因故障退出运行。由潮流计算可得线路 L_{6-10} 功率升高至 12.38 MW, 超过长期运行允许功率, 出现过负荷。线路过负荷后, 各 SG 按照预设控制策略调节出力, 各 SG 节点的功率变化如图 4 所示。在 SG 的调节下, 过负荷线路 L_{6-10} 的功率以及温度如图 5(a)和图 5(b)所示。

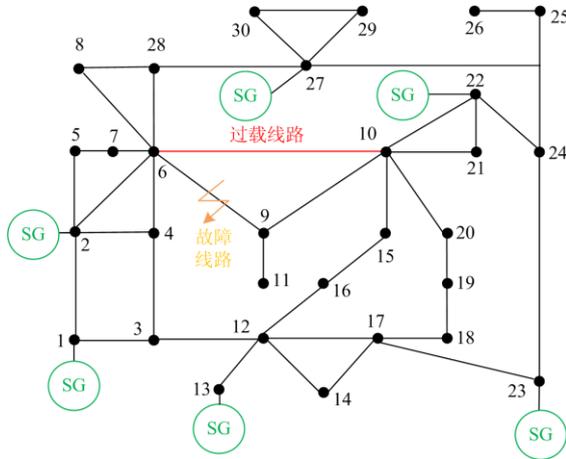


图 3 仿真系统结构

Fig. 3 Structure of simulation system

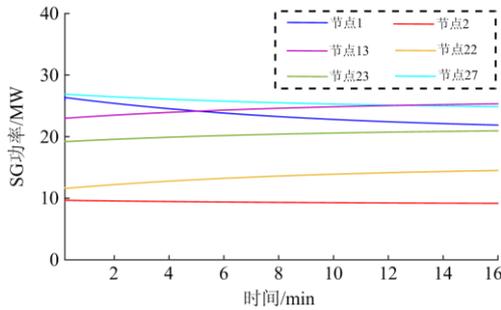
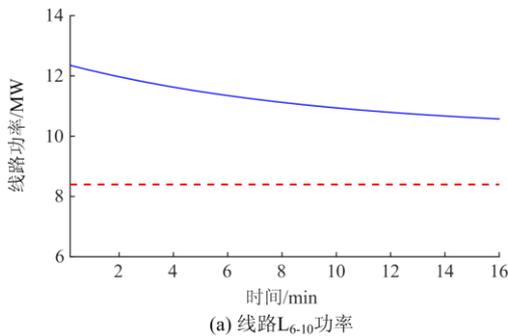
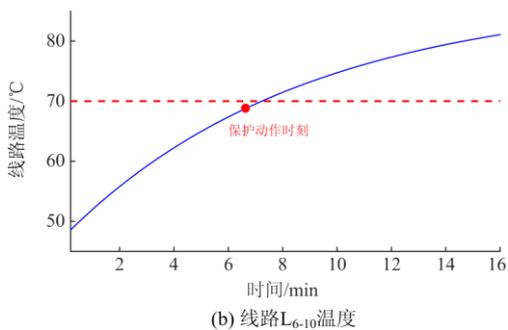


图 4 SG 控制策略(策略 1)

Fig. 4 Control strategy (strategy 1) of SG



(a) 线路L₆₋₁₀功率



(b) 线路L₆₋₁₀温度

图 5 策略 1 下线路功率以及温度

Fig. 5 Line flows and temperature under strategy 1

表 1 策略 1 下预估动态允许过负荷时间

Table 1 Estimated dynamic allowable overload

time under strategy 1					
采样时刻/min	线路功率/MW	动态允许过负荷时间/min	采样时刻/min	线路功率/MW	动态允许过负荷时间/min
0.5	12.28	8.56	4	11.63	7.29
1	12.17	8.56	4.5	11.55	7.11
1.5	12.07	7.94	5	11.48	7.11
2	11.97	7.94	5.5	11.41	6.96
2.5	11.88	7.43	6	11.35	6.96
3	11.79	7.43	6.5	11.29	6.85
3.5	11.71	7.29	—	—	—

根据式(13), 可得各次采样的预估动态允许过负荷时间如表 1 所示。由图 5(a)可知, 在该预设的控制策略下, 过负荷线路的功率变化速度逐渐下降, 由表 1 可知, 随着过负荷线路功率变化速度的下降, 预估动态允许过负荷时间逐渐减小, 与理论分析一致。根据表 1 可得, 在 6.5 min 前, 线路 L₆₋₁₀ 功率均大于长期运行允许功率。在 6 min 前的预估动态允许过负荷时间均大于采样间隔, 而 6.5 min 时的预估动态允许过负荷时间为 6.85 min, 小于 7 min。因此, 在 6 min 前每次采样时整定的保护动作时间为无穷大; 而在 6.5 min 采样时整定的保护动作时间为 6.51 min。

如图 5(b)所示, 若不考虑保护的动作用, 线路 L₆₋₁₀ 温度在 7.23 min 时达到 70 °C, 而此时线路功率为 11.20 MW, 仍处于过负荷状态, 线路温度持续升高, 导致线路损坏。预估动态过负荷时间的计算值与实际值之差仅为 0.38 min, 与保护动作时间相差 0.72 min。考虑输电线路动态热特性的自适应过负荷保护, 在保证线路安全的条件下, 尽可能延缓线路的切除。

由图 5(a)可见, 在 5 min 时过负荷线路 L₆₋₁₀ 功率为 11.48 MW, 温度仅为 63.66 °C。若按照固定的动作时间 5 min 切除线路, 虽然能够保证线路 L₆₋₁₀ 安全, 但线路切除时温度与最大耐受温度之差为 6.34 °C, 动作时间与最大允许过负荷时间之差为 2.23 min。过负荷线路被过早切除。若不考虑线路功率动态变化, 仅根据过负荷初始时刻功率, 利用式(13)可得允许过负荷时间为 3.72 min, 与本文的整定时间相差 2.79 min。此时虽然能够保证线路安全, 但同样因线路过早切除增加了电力系统连锁故障的风险。

增加各节点 SG 功率的调节速度, 改变 SG 控制策略如图 6 所示(简称策略 2), 此时线路 L₆₋₉ 退出运行后, 过负荷线路 L₆₋₁₀ 的功率和温度如图 7 所示。

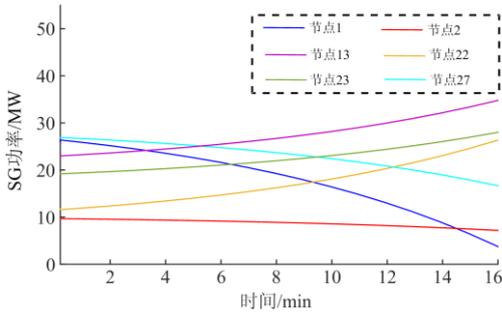
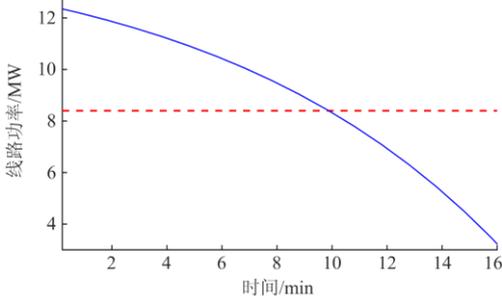


图 6 SG 控制策略(策略 2)

Fig. 6 Control strategy (strategy 2) of SG

根据式(13),可得在图6所示的SG控制策略下,各次采样的预估动态允许过负荷时间如表2所示。由图7(a)可知,在该预设的控制策略下,过负荷线路的功率变化速度逐渐上升,由表2可知,随着过负荷线路功率变化速度的上升,预估动态允许过负荷时间逐渐增加,同样符合理论分析。根据表2可得,在10 min前,线路L₆₋₁₀功率均大于长期运行允许功率,并且预估动态允许过负荷时间均满足式(5)中一式,因此保护动作时间均为无穷大。而在



(a) 线路L₆₋₁₀功率

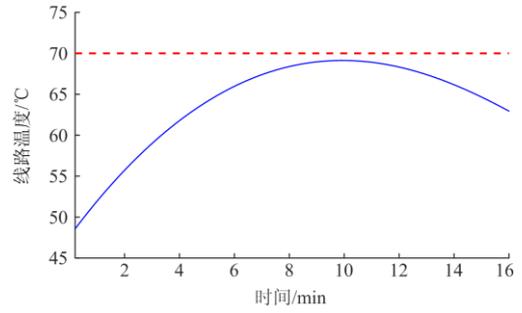
表 2 策略 2 下预估动态允许过负荷时间

Table 2 Estimated dynamic allowable overload time under strategy 2

功率测量 时间/min	线路功率/ MW	动态允许过负荷 时间/min	功率测量 时间/min	线路功率/ MW	动态允许过负荷 时间/min	功率测量 时间/min	线路功率/ MW	动态允许过负荷 时间/min
0.5	12.28	8.56	4	11.25	∞	7.5	9.77	∞
1	12.17	8.56	4.5	11.06	∞	8	9.52	∞
1.5	12.03	10.42	5	10.88	∞	8.5	9.26	∞
2	11.89	10.42	5.5	10.67	∞	9	8.98	∞
2.5	11.74	12.56	6	10.45	∞	9.5	8.69	∞
3	11.59	12.56	6.5	10.24	∞	10	8.39	—
3.5	11.42	∞	7	10.02	∞	—	—	—

5 结论

过负荷线路的允许过负荷时间随线路功率的变化而动态变化。针对现有过负荷保护忽略线路功率变化的影响可能导致过负荷线路保护过早动作,进而引发连锁故障的问题,分析了线路功率变化对



(b) 线路L₆₋₁₀功率

图 7 策略 2 下线路功率以及温度

Fig. 7 Line flows and temperature under strategy 2

10 min 时,线路功率 L₆₋₁₀ 下降至 8.39 MW,恢复至正常范围,保护退出,线路 L₆₋₁₀ 继续并网运行。

如图7(b)所示,若不考虑保护的动作用,线路 L₆₋₁₀ 温度在 9.96 min 时达到最大值 69.13 °C,随后温度开始下降,因此线路 L₆₋₁₀ 不需要切除也能保证安全。考虑输电线路动态热特性的自适应过负荷保护,在保证线路安全的条件下,同样能够尽可能避免线路的切除。

由图7(a)可见,在5 min 时过负荷线路 L₆₋₁₀ 功率为 11.25 MW,温度仅为 62.64 °C。若按照固定的动作时间 5 min 切除线路,虽然能够保证线路 L₆₋₁₀ 安全,但线路切除时温度与最大耐受温度之差为 7.36 °C,并且保护错误地将线路 L₆₋₁₀ 切除。若不考虑线路功率动态变化,仅根据过负荷初始时刻功率,利用式(13)可得允许过负荷时间为 3.72 min,此时线路功率为 11.34 MW,保护仍然会误动,导致线路 L₆₋₁₀ 被切除。可见,这两种保护动作时间的整定方法虽然能够保证线路安全,但均出现误动。

线路热特性的影响,发现和论证了线路允许过负荷时间的动态性特征,提出了预估动态过负荷时间的思想,进而提出了考虑线路动态热特性的自适应保护方法。该方法可计及线路功率变化的影响,通过就地功率测量准确计算线路允许过负荷时间,从而

实施精准的过负荷保护, 既考虑设备安全又兼顾了电力系统连锁故障的风险, 且该方法不依赖于通信, 原理简单、易于实现, 具有较好的工程实用性。

参考文献

- [1] 刘友波, 胥威汀, 丁理杰, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(二)—关键特征与研究启示[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 146-155.
LIU Youbo, XU Weiting, DING Lijie, et al. Power system cascading failure analysis theories and application II-key features of real cascading failures and revelation aspects[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 146-155.
- [2] 胡剑, 王建, 熊小伏, 等. 计及线路动态电热特性的交直流混联电网过载控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 66-75.
HU Jian, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. An overload control strategy for AC/DC hybrid power grid considering dynamic electro-thermal characteristics of transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 66-75.
- [3] 尚学军, 霍现旭, 郑晓冬, 等. 基于离散小波分析与K-means 聚类算法的MMC-HVDC 输电线路保护方案[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 52-57.
SHANG Xuejun, HUO Xianxu, ZHENG Xiaodong, et al. MMC-HVDC transmission line protection scheme based on discrete wavelet analysis and K-means clustering algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 52-57.
- [4] 张晶晶, 陈博进, 尉静慧, 等. 一种交直流系统连锁故障预测方法及风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 125-132.
ZHANG Jingjing, CHEN Bojin, WEI Jinghui, et al. AC-DC system cascading failure simulation method and risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 125-132.
- [5] 陈强, 王建, 熊小伏, 等. 考虑设备动态过载能力的风电送出通道紧急过载运行策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 163-171.
CHEN Qiang, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Emergency overload operation strategy for sending transmission channel of wind power considering dynamic overload capability of equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 163-171.
- [6] PRIYANKA D, RACHIT M, FARUK K, et al. Impact of topology on the propagation of cascading failure in power grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1970-1978.
- [7] SUN Qiming, SHI Libao, NI Yixin, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 1-10.
- [8] MAHSHID R N, MAJEED M H. Cascading failures in interdependent infrastructures: an interdependent Markov-Chain approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1997-2006.
- [9] 王紫琪, 和敬涵, 张大海. 双目标递进式断面过载保护控制协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 140-148.
WANG Ziqi, HE Jinghan, ZHANG Dahai. Bi-objective progressive coordinated optimization strategy for protection and control of transmission section overload[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 140-148.
- [10] 杨文辉, 毕天姝, 薛安成, 等. 潮流转移区域后备保护动作特性自适应调整策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 1-6.
YANG Wenhui, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Adaptive strategy for backup protections within power transferring area against cascading trips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 1-6.
- [11] 徐岩, 吕彬, 王增平. 基于广域测量系统的潮流转移识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 154-160, 23.
XU Yan, LÜ Bin, WANG Zengping. A power flow transfer identification scheme based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 154-160, 23.
- [12] 朱晓彤, 赵青春, 李园园, 等. 防止过负荷时相间距离 III 段保护误动的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 7-11.
ZHU Xiaotong, ZHAO Qingchun, LI Yuanyuan, et al. A new method to prevent maloperation of phase-to-phase zone III relays due to overload[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 7-11.
- [13] 柳焕章, 周泽昕. 线路距离保护应对事故过负荷的策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 112-117.
LIU Huanzhang, ZHOU Zexin. Post-fault over-load maloperation countermeasure of transmission line distance protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 112-117.
- [14] 徐岩, 韩平. 防止距离 III 段保护因过负荷误动方法的分析与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 1-7.
XU Yan, HAN Ping. Analysis and improvement for the scheme to prevent zone III distance protection from incorrect operation caused by non-fault overload[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 1-7.

- [15] 游家训, 吴蓉, 叶康, 等. 一起自切闭锁母差隐性缺陷导致故障扩大的事故分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 102-107.
YOU Jiaxun, WU Rong, YE Kang, et al. Analysis of a blackout escalation caused by hidden failure lying in blocking logic between auto-switching protection and bus differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 102-107.
- [16] 王英英, 金明亮, 王玉龙, 等. 应对线路差动主保护丢失的后备保护应急方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 174-181.
WANG Yingying, JIN Mingliang, WANG Yulong, et al. Emergency plan for backup protection against loss of line differential main protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 174-181.
- [17] 戴志辉, 刘譞, 焦彦军. 基于保护动作概率模型的距离保护误动识别[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6057-6065.
DAI Zhihui, LIU Xuan, JIAO Yanjun. Misoperation identification of distance protection based on protection operation probability model[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6057-6065.
- [18] 刘刚, 陈莎, 仝进, 等. 含分布式电源接入的配电网故障恢复方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 50-56.
LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, et al. Fault restoration method for power distribution networks considering distributed generations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 50-56.
- [19] 胡剑, 王建, 熊小伏, 等. 计及线路动态电热特性的交直流混联电网过载控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 66-75.
HU Jian, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. An overload control strategy for AC/DC hybrid power grid considering dynamic electro-thermal characteristics of transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 66-75.
- [20] JINXIN O Y, XIAOXUAN L, XUE D, et al. Voltage control method for active distribution networks based on regional power coordination[J]. Energies, 2019, 12(22).
- [21] 张辉. 运行条件下输电线路热载荷能力研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
ZHANG Hui. Study on heat capacity of transmission lines being operated[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [22] 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.
- [23] 汪华. 广域后备保护算法及就地站协调配合策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
WANG Hua. The research on algorithm of wide area protection and local substation coordination strategy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.
- [24] ZHANG J, PU J, MCCALLEY J D, et al. A Bayesian approach for short-term transmission line thermal overload risk assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 770-778.
- [25] 任建文, 李莎, 严敏敏, 等. 基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧急控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 392-397.
REN Jianwen, LI Sha, YAN Minmin, et al. Emergency control strategy for line overload based on power flow tracing algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 392-397.
- [26] 颜湘武, 宋子君, 崔森, 等. 基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 530-541.
YAN Xiangwu, SONG Zijun, CUI Sen, et al. Primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on variable power point tracking and supercapacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 530-541.
- [27] 焦在滨, 马逢, 李宗博. 考虑天然气传输特性的气电耦合系统的联合运行与紧急过负荷控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊 1): 77-83.
JIAO Zaibin, MA Feng, LI Zongbo. Study on combined operation of gas-electricity coupling system and emergency overload control considering the characteristics of natural gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 77-83.

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-09-03

作者简介:

欧阳金鑫(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、新能源并网等; E-mail: Jinxinyo@163.com

余建峰(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: qinyjf@163.com

龙晓轩(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 745599747@qq.com

(编辑 许威)