

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180604

计及涌流影响的零序电流保护风险评估

王友怀¹, 张浩¹, 周虎兵¹, 张焕青¹, 洪悦¹, 殷建军²

(1. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 针对高压内置变压器空投导致零序电流保护误动的问题, 从系统层面研究计及涌流影响的零序电流保护风险评估, 以完善现有风险评估模型在涌流场景下未涉及盲区的不足。考虑影响涌流产生的多因素并非完全可得, 提出了一种计及参量完备性的误动概率计算模型。在参量信息缺失不可得时, 利用电网设备状态监测数据库中的数据补充计算, 并分配相应的权重得到综合加权误动概率。在此基础上给出了具体风险指标和操作建议。通过具体的算例对所提出的风险评估方法进行展示, 评估结果与实际运行中线路和母联动作结果一致。

关键词: 励磁涌流; 零序电流保护; 风险评估; 误动概率模型

Risk assessment of zero sequence current protection considering inrush current

WANG Youhuai¹, ZHANG Hao¹, ZHOU Hubing¹, ZHANG Huanqing¹, HONG Yue¹, YIN Jianjun²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Aiming at the problem of zero sequence current protection caused by high voltage built-in transformer, the risk assessment of zero sequence current protection considering the impact of inrush is studied from the system level in order to improve the shortage of existing risk assessment model in the inrush scene. Considering the multiple factors affecting inrush current is not entirely available, a calculation model of malfunction probability considering the completeness of parameters is proposed. When the missing parameter information is not available, the comprehensive weighted misoperation probability is obtained by using the data in the monitoring database of the power grid equipment state and assigning the corresponding weight. On this basis, specific risk indicators and operational suggestions are given. In this paper, a specific example is given to demonstrate the proposed risk assessment method, and the results are consistent with the actual operation of the line and bus action results.

This work is supported by Project of State Grid Hubei Electric Power Company (No. 26150515003C) and National Natural Science Foundation of China (No. 51207113).

Key words: magnetizing inrush current; zero sequence current protection; risk assessment; misoperation probability model

0 引言

近年来, 随着智能变电站的不断投运, 新技术的应用实践经验不足及支撑体系尚未完善给其二次系统带来新的挑战。由于高压内置变压器具备限制短路电流的特点, 其不断在智能变电站中获得推广应用, 然而其投运时会引发多起零序电流保护误动的事件^[1-3], 威胁到电网的安全稳定运行。当前对于这类问题的研究大多属于单体式的“被动”分析

及应对策略^[4-8]。显然, 若能从系统层面对这类保护装置面临的风险进行“主动”评估, 给予一定的风险警示, 便可为新建变电站或者已投运变电站变压器的空投给出相应的指导意见, 以规避此类误动事件, 提高二次系统的可靠性。

继电保护风险评估利用先进的实时测量技术, 将风险评估理论方法纳入电网可靠性指标中^[9-10]。风险评估通过预测风险事件发生概率, 分析量化其可能造成的影响损失, 确定承受风险的能力。在保护装置状态可靠性评估方面, 主要有马尔科夫分析法^[11-13]、故障树分析法^[14-15]和蒙特卡洛模拟法^[16]等。

针对不同的保护原理, 相关学者研究了具体的

基金项目: 国网湖北省电力公司项目资助(26150515003C); 国家自然科学基金项目资助(51207113)

风险评估模型^[17-20]。文献[17]针对阶段式电流保护, 提出了涵盖拒动和误动概率的运行风险评估模型, 从灵敏度和保护范围的角度分析了阶段式电流保护中各段保护拒动、误动机理, 并设计了相应的可靠性指标。在此基础上, 文献[18]将拒动和误动概率引入距离保护, 详细分析了各种特性的距离保护在不同测量阻抗区域内启动与否的概率, 并提出了相应的运行风险指标。文献[19]则针对零序电流保护, 根据实际运行状态和定值建立计算零序电流保护原理性运行失效概率, 将具体的负荷损失以及发电损失作为风险指标引入系统的实时运行风险评估。

继电保护装置的风险评估虽已取得累累硕果, 然而其在应用于新场景——变压器空投导致零序电流保护时, 将会出现一定的不适应性。在保护原理模型方面, 对于涌流造成的电流保护误动是由于特定场景下保护原理设计方面存在盲区, 传统风险评估模型并没有考虑到此问题。为此, 本文提出了一种计及涌流影响的零序电流保护风险评估理论, 利用实际掌握的参量数据进行推导及仿真计算可得到具体的保护误动概率。根据影响涌流产生的各参量完备性, 设计了不同的保护误动概率求解方法, 同时给出了相应的误动风险指标。

1 变压器空投零序涌流的产生

图 1 所示为单相变压器空载合闸等效电路模型, $u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$ 为交流电源, R_s 为系统等效电阻, L_s 为系统等效电感, R_σ 、 L_σ 分别为变压器一次绕组漏电阻与漏电感, R_m 、 L_m 分别为变压器等效励磁电阻与等效励磁电感。设 $t=0$ 时刻变压器空载合闸, 电压的合闸相位角为 α , $R = R_s + R_\sigma + R_m$, $L = L_s + L_\sigma + L_m$, $\psi = Li$, 合闸回路的电压方程为

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) = R \frac{\psi}{L} + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

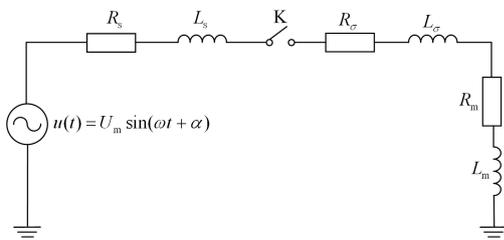


图 1 单相变压器空载合闸等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of single-phase transformer for no-load switching-in

考虑到铁芯中的磁链不能突变, 设变压器空载

投入瞬间($t=0$)铁芯剩磁为 ψ_r , 稳态磁链幅值为

$$\psi_r = \frac{LU_m}{\sqrt{(\omega t)^2 + R^2}}, \text{ 阻抗角 } \varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}, \text{ 时间常数}$$

$$\tau = \frac{L}{R}. \text{ 解微分方程(1)可得}$$

$$\psi(t) = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + [\psi_r - \psi_m \sin(\alpha - \varphi)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

在变压器空载合闸时, $\omega L \gg R$, 故 $\varphi \approx 90^\circ$, 式(2)可转化为

$$\psi(t) = -\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_r + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

变压器进入饱和后产生涌流, 此阶段磁化特性为非线性。为便于分析, 对其非线性磁化特性进行简化处理, 在饱和区域内假设励磁回路电感恒定。根据磁链与电流的关系, 近似得到励磁涌流的表达式为

$$i_\mu(t) = [-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_r + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{t}{\tau}}] / L \quad (4)$$

上述分析建立在单相变压器空载合闸等效电路模型的基础上, 类比可分析三相励磁涌流, 对此本文不再过多叙述。由于励磁回路及系统阻抗中电阻成分的存在, 各相涌流呈现衰减趋势, 可将其等效为衰减谐波电流源 $i_{\mu A}$ 、 $i_{\mu B}$ 、 $i_{\mu C}$, 这些不对称涌流流经零序网络通路时将产生零序分量, 图 2 所示为变压器空载合闸零序等效网络。

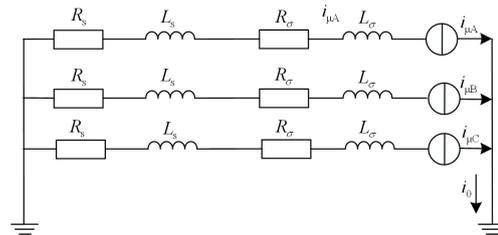


图 2 变压器励磁涌流零序等效网络

Fig. 2 Zero sequence equivalent circuit of magnetizing inrush current

根据叠加定理及三相不对称电路的特点, 考虑到合闸时各相剩磁、合闸角以及铁芯特性的差异, 变压器各相进入铁芯饱和程度不同, 三相励磁涌流各自偏向于时间轴一侧不对称, 导致其涌流之和不为 0, 即产生了零序涌流 i_0 , 可表示为

$$i_0(t) = i_{\mu A}(t) + i_{\mu B}(t) + i_{\mu C}(t) \quad (5)$$

2 计及涌流影响的零序电流保护多参量风险评估

在中性点有效接地系统中, 零序涌流的流通使

得系统所配置的零序电流保护面临误动风险。传统风险评估模型大多是在系统参数已知的情况下,从保护原理和范围的角度推算承受的风险概率。事实上对于励磁涌流可能导致的保护误动事件,此场景下传统基于保护范围原理的划定拒动误动概率的风险评估不再适用。此外,也欠缺对于风险评估中所需参量不完备场景的应对。本节从上述两个角度着手,提出了一种针对励磁涌流场景的考虑参量完备性的风险评估概率模型。

由第1节分析可知,变压器空载合闸产生涌流受多因素影响,如能获得各影响参量的具体数据,便可通过计算机仿真软件的计算推演得出,具体网络中某段零序电流保护受励磁涌流影响误动的概率。考虑到实际风险评估中,各参量信息(合闸角、剩磁、运行方式等系统参数)的完整性并不能保证,对此在风险评估系统的设计中设置多个模块,根据信息的完整度进入不同的误动风险概率计算模块,如图3所示。

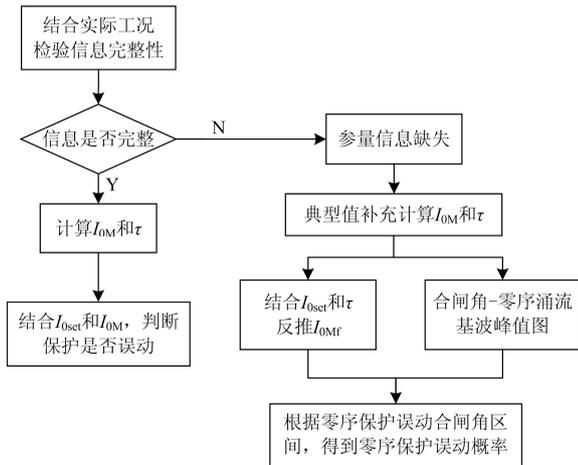


图3 计及参量信息完备性的风险概率计算流程

Fig. 3 Calculation process of risk probability considering completeness of parameter information

2.1 参量信息完备模型

在对指定运行工况且各参量信息完全具备情况下,根据拓扑零序网络结合具体参数求得各保护安装处所流过的零序涌流,通过傅里叶分解求得零序涌流的基波分量,进一步利用差分或求导方式得到其峰值 I_{0M} 。同一处保护通常安装有多段零序电流保护(如零序I段、II段、III段、IV段),其整定电流和动作时间往往不同,针对各段零序电流保护分别判断是否误动,判据为

$$I_{0M} e^{-\frac{t_i}{\tau}} > I_{0set,i} \quad (6)$$

式中: $I_{0set,i}$ 为第*i*段零序电流保护的整定电流; t_i 为

该段保护的整定时间。

第*i*段零序电流保护满足式(6)时,则该段保护误动的概率设为 $P_{WL,i} = 1$,反之其概率为 $P_{WL,i} = 0$ 。各参量信息都已具备时,变压器已经合闸投运,相关零序保护是否误动为确定性事件,此时进行变压器空载合闸可能导致零序保护误动的风险评估无法起到相应的警示作用,但其评估结果可与当前零序保护是否误动的结果做对比,以检验评估系统的准确性和有效性。

2.2 参量信息缺失模型

在对变压器空载合闸可能导致零序保护误动的风险评估通常是在变压器投运前进行的,投运合闸时刻决定了合闸相角,故合闸角在投运前进行风险评估的仿真计算过程中是未知的。此外,也会出现其他参量信息不足的情况,无法对零序电流保护是否误动进行直接判断,由于篇幅限制,本文仅对若干典型参量信息缺失的场景进行分析。考虑到零序涌流基波分量的峰值 I_{0M} 和衰减时间常数 τ 是主导零序涌流波形的两个关键变量,可利用 I_{0M} 和 τ 在风险评估中所起的重要串接作用,以合闸角-零序电流基波分量峰关系为依托,构建参量信息缺失的风险评估概率模型。

(1) 单参量信息缺失

在变压器投运时,其系统电压、运行方式、线路参数等诸多参量都是确定已知的,最为复杂的剩磁也可通过多种方式测量(如磁通计WB-1)/经验数据估量获取。此种场景下,唯有合闸角信息缺失,借助计算机仿真系统计算一个周波内(360°)不同合闸角下的零序电流基波峰值,并绘制出相应的合闸角-零序电流基波峰值图,如图4所示。

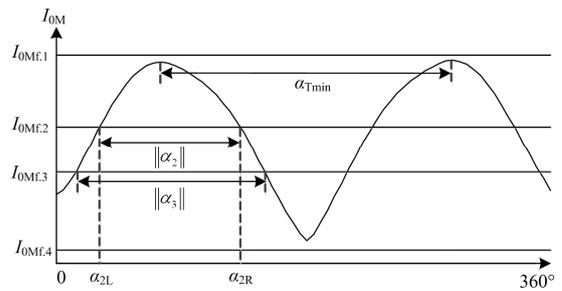


图4 合闸角-零序电流基波峰值关系图

Fig. 4 Diagram of relationship between the switching angle and the peak value of zero sequence current

以图4为例,详述误动风险概率的求解过程。

① 根据已知信息计算零序涌流基波衰减常数

$$\tau = \frac{L_s + L_\sigma + L_m}{R_s + R_\sigma + R_m}。$$

② 利用各段零序电流保护的整定电流 $I_{0set,i}$ 和整定动作时间 t_i , 反推出各段保护动作的最小零序电流基波峰值。

③ 确定零序保护误动的合闸极限角 α_{iL} 、 α_{iR} 以及对应的合闸区间长度 $\|\alpha_i\|$ 。合闸极限角可通过 $I_{0M}(\alpha_i)=I_{0Mf,i} \cdot \frac{\partial I_{0M}(\alpha_{iL})}{\partial \alpha} > 0; \frac{\partial I_{0M}(\alpha_{iR})}{\partial \alpha} < 0$ 确定。考虑到一个周波内可能存在多个合闸极限角, 合闸区间长度定义为 $\|\alpha_i\| = \alpha_{iR} - \alpha_{iL}$, 式中 α_{iL} 、 α_{iR} 为相邻两合闸极限角, 且 $\alpha_{iL} < \alpha_{iR}$ 。

④ 确定零序电流基波峰值的最小合闸周期 $\alpha_{Tmin} = \min\{\alpha_{T1}, \alpha_{T2}, \dots\}$; $I_{0M}(\alpha) = I_{0M}(\alpha + \alpha_T)$ 。

⑤ 利用③、④所求得的 $\|\alpha_i\|$ 以及 α_{Tmin} , 计算零序保护误动风险概率为

$$P_{WL,i} = \frac{\|\alpha_i\|}{\alpha_{Tmin}} \quad (7)$$

(2) 多参量信息缺失

在某次对变压器空投进行风险评估时, 由于剩磁测量的复杂性, 有时很难在变压器运行现场进行测量。另外, 若经验数据不足以支撑对本变压器铁芯剩磁进行预估, 铁芯剩磁即为未知量, 此种情况下, 附加合闸角未知即构成双参量信息缺失的场景。

电网系统通常会配备设备状态运行监测数据库, 以存储故障数据、运行数据以及历史数据等。从此数据库选取 n 组变压器空投时的典型不同剩磁参量(可为本变压器历史空投数据或者其他变压器空投数据), 将每组剩磁作为已知参量代入相关计算, 重复(1)中的方法进行该场景下的风险评估概率求解, 所得每组剩磁参量下的第 i 段零序保护误动概率为 $P_{WL(X),i}$ 。结合不同组剩磁参量下所求得零序保护误动风险评估的综合加权概率为

$$P_{WL(X),i} = \sum_{X=1}^n J_X P_{WL(X),i} \quad (8)$$

式中, J_X 为同一组剩磁参量下所求得零序保护误动风险的权重, 不同段零序保护误动概率的权重相同, 且 $\sum_{X=1}^n J_X = 1$ 。其中, 权重 J_X 可按如下方式选择: 对于随机选取的 n 组不同参量代入计算所得结果, 其对应的权重分别为 $1/n$; 若 n 组参量中有 m 组重复性结果(重复次数分别为 $m_1, m_2, m_3, m_4, \dots$), 则其结果对应权重分别为 $m_1/n, m_2/n, m_3/n, m_4/n, \dots$ 。

事实上, 对于某些待开发新投运的变电站区域, 对其变压器空投进行零序保护误动风险评估, 往往面临着更多参量信息缺失的场景, 同样地可借助数据库中存储的同“类”典型数据对其补充, 并在此

基础上进行仿真计算, 将所求得的误动概率乘以一定的权重, 得到综合加权概率。以系统运行方式、剩磁以及合闸角均未知为例, 简述其具体求解过程。

系统运行方式未知时, 其等效系统阻抗和零序电流基波的衰减常数无法确定, 仅利用零序保护的整定电流 $I_{0set,i}$ 和整定动作时间 t_i 无法反推得到零序电流基波分量的峰值 $I_{0Mf,i}$ 。考虑到系统通常在若干特定运行方式下运行, 可选取 m 组典型运行方式(如 $m=2$, 仅选取大运行方式和小运行方式), 每组特定运行方式下, 除运行方式外其他参量仍可视作未知量, 三参量信息缺失便转化为双参量信息缺失场景, 依照上述分析方法求解每组特定运行方式下的保护误动风险概率为

$$P_{WL(Y),i} = \sum_{X=1}^n J_X P_{WL(X),i} \quad (9)$$

相应地, m 组特定运行方式下的零序保护误动风险评估的综合加权概率为

$$P_{WL,i} = \sum_{Y=1}^m J_Y P_{WL(Y),i} \quad (10)$$

式中, J_Y 为同一组运行方式下所求得零序保护误动风险的权重, $\sum_{Y=1}^m J_Y = 1$ 。

此外, 考虑到系统中的配置多为带方向的零序电流保护, 方向元件的存在对误动风险的影响不可忽略。考虑到进行风险评估时通常已知网架结构, 可利用此种网络中方向元件的判定结果与初步综合加权误动概率(将上文中的综合加权误动概率定义为初步综合加权误动概率 $P_{WL,i}(\text{initial})$)相乘, 得到最终的综合加权误动概率 $P_{WL,i}(\text{final})$ 。如此一来, 方向元件的加入就不会影响真实误动概率的判断。

2.3 误动风险评估

对于某处配置的多段零序电流保护而言, 在参量信息完备情况下, 各段保护的误动概率只有两种结果, 0 或 1。在参量信息缺失情况下, 各段零序电流保护误动的综合加权概率区间为 $[0,1]$, 概率越大表明变压器产生的涌流可能导致该处零序电流保护误动的风险越大。为便于对其误动风险进行评估, 现依据误动概率分布给出评估指标, 如表 1 所示。

表 1 不同误动概率对应风险评估

Table 1 Risk assessment of different misaction probability			
误动概率/%	风险评估	参量完备性	是否建议投运
0	无风险	完备	是
(0, 0.2]	较小风险	不完备	是
(0.2, 0.7)	中等风险	不完备	否
[0.7, 1.0)	较高风险	不完备	否
1	顶级风险	完备	否

对于误动概率为 0 的参量完备性的操作而言, 已经过仿真计算反演推理得出变压器空投不会导致零序电流保护误动; 对于误动概率在(0, 0.2]的参量缺失性操作而言, 由于风险较小, 可进行变压器的投运。而对于误动概率在(0.2, 0.7)和[0.7, 1.0)的参量缺失性操作而言, 变压器空投有中等以及较高风险导致零序电流保护误动, 不建议对变压器投运。对于误动概率为 1 的参量完备性操作而言, 此时零序电流保护误动与否已为确定性事件, 肯定会误动, 风险达到最高值。实际上, 对于是否投运的概率界限取值可由现场专家进行确定, 该界限值越大时, 依据该结果进行变压器投运的风险也越大, 因此, 不建议该界限值取较大数值。

3 算例分析

结合某地区变压器空投导致零序电流保护误动的具体事例, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 5 所示的 220 kV 系统模型, 部分零序电流保护整定参数如表 2 所示。模拟仿真变压器空投产生零序涌流在系统网络流通场景, 假定合闸角、剩磁、系统运行方式参量信息缺失, 对系统中变压器 1 的两段零序电流保护、母联 2 的两段零序电流保护、线路 3 的

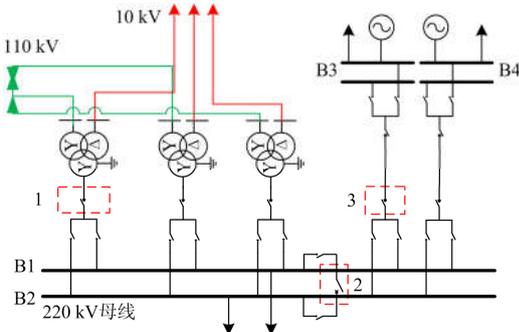


图 5 220 kV 系统等值模型

Fig. 5 Equivalent model of 220 kV system

表 2 系统部分零序电流保护整定参数

Table 2 System partial zero sequence current protection setting parameters

	保护配置	整定电流/A	整定时间/s
线路 3	零序电流 I 段	3 000	0
	零序电流 II 段	1 200	0.5
	零序电流 III 段	500	3.0
	零序电流 IV 段	300	4
母联 2	零序电流 I 段	600	0.2
	零序电流 II 段	240	0.5
变压器 1	零序电流 I 段	500	3.5
	零序电流 II 段	300	5

四段零序电流保护误动风险进行评估。

根据 2.2 节所提的多参量风险评估模型, 首先设定 5 种系统运行方式(改变 B3、B4 侧系统等值阻抗选取 5 种不同的运行方式), 每组运行方式分配权重 0.2, 将具体运行方式(如运行方式 1)参数输入后, 选择具体的剩磁参数将其输入系统仿真计算, 三参量缺失退化为单参量缺失。以合闸角 360°内每隔 5°做一次仿真计算, 绘制零序基波峰值随合闸角变化关系, 如图 6 所示。

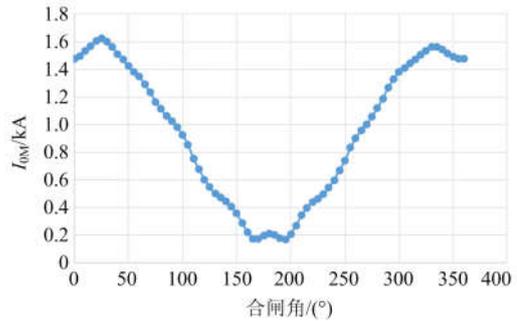


图 6 零序涌流基波峰值随合闸角变化关系图

Fig. 6 Diagram of relationship between peak value of zero sequence inrush current and switching angle

以母联 2 为例, 仿真计算得到该处零序电流的衰减时间常数为 0.3 s, 导致两段零序电流保护误动的零序基波幅值应分别大于 1 168.6 A 和 1 270.7 A, 不误动的合闸区间分别为(75°, 275°)和(65°, 290°), 合闸周期为 $T=300^\circ$, 根据式(7)可得零序电流 I 段、II 段保护误动概率分别为 33.3%、25%。以此类推, 进行大量仿真模拟计算其他剩磁下保护误动概率, 每组分配权重 0.1, 根据式(9)求和得到不同剩磁下综合加权概率 $P_{WL(1),i}$, 结果见表 3。

表 3 不同剩磁下母联 2 零序电流保护误动概率

Table 3 Misoperation probability of bus 2 zero sequence current protection under different remanence

剩磁/p.u.	零序电流 I 段误动概率/%	零序电流 II 段误动概率/%
0	0	0
0.1	4.5	0
0.2	12.6	3.2
0.3	21.9	11.7
0.4	33.3	25.0
0.5	47.2	38.2
0.6	59.1	46.3
0.7	62.7	53.9
0.8	66.9	57.6
0.9	68.1	60.2
$P_{WL(1),i}/\%$	37.63	29.61

表3中结果为设定运行方式1下的仿真计算所得,随着剩磁的不断增大,其产生的涌流越大,导致零序电流保护的误动概率也随之增大。此外还需结合其他4种运行方式下的重复性仿真计算结果,得到母联2零序电流保护的最终综合加权误动概率 $P_{WL,i}$,具体结果如表4所示。

表4 不同运行方式下母联2零序电流保护误动概率

Table 4 Misoperation probability of bus 2 zero sequence current protection under different operation modes

运行方式	零序电流 I 段误动概率/%	零序电流 II 段误动概率/%
1	37.63	29.61
2	30.25	24.34
3	24.28	20.11
4	19.76	17.21
5	16.32	14.98
$P_{WL(i)}/\%$	26.65	21.25

随着运行方式的不断减小,系统的等值阻抗不断增大,导致涌流的基波幅值越小,且衰减得越快,二者综合作用使得零序电流保护误动的概率降低。上述仿真结果显示,母联2的零序电流 I 段保护综合加权误动概率 $P_{WL,1} = 26.65\%$,零序电流 II 段保护综合加权误动概率 $P_{WL,2} = 21.25\%$ 。

同样地,对变压器配置的零序电流保护1以及线路配置的零序电流保护3进行仿真计算,得到各段零序电流保护的误动概率,统计结果如图7所示。

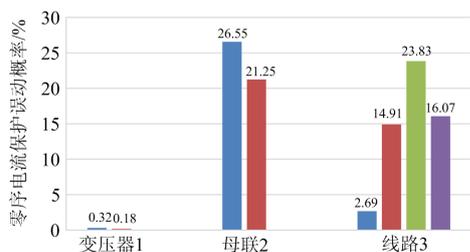


图7 系统零序电流保护综合加权误动概率统计

Fig. 7 Statistical results of integrated weighted misoperation probability for zero sequence current protection of system

由图7中结果可以看到,所搭建仿真系统的线路及母联的零序电流保护有较大概率误动。其中,线路零序 I 段、II 段、III 段、IV 段保护误动概率分别达到 2.6%、14.91%、23.83%和 16.07%,线路零序 III 段电流保护误动概率最高;母联零序电流保护由于其整定时间较短,更容易发生由零序涌流引发的误动,图7显示母联零序 I 段、II 段保护误动概率分别达到 26.55%、21.25%;而变压器零序 I 段、II 段保护误动概率分别达到 0.32%、0.18%,此量级的保护误动概率可忽略。该结果与本算例所依据的

事例现场动作结果吻合。事实上,与一次仿真计算所得概率相比,综合加权误动概率为不同参量设定下各结果的集中性体现。

4 结论

本文针对变压器空投时导致系统所配置的零序电流保护误动的问题,从系统层面提出了一种考量误动风险的多参量风险评估方法。其中建立了一种计及影响涌流产生的各参量完备性的误动风险概率模型,在参量信息缺失模型中,通过仿真模拟计算零序涌流基波峰值和衰减时间常数这两个主导涌流波形的关键量,利用其与合闸角关系测算可能误动的合闸区间,并结合具体的最小合闸周期得到各段零序电流保护误动概率。结合具体实例在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型,对本文提出的风险评估进行算例展示。

考虑到二次系统的风险评估正处于初期起步阶段,本文所提出的多参量风险评估针对性较强,可对电力系统风险评估理论的研究和发展进行相应补充,推动提高二次系统的可靠性。文中风险评估所采用的设计思想并不局限于零序电流保护,可借鉴运用于其他原理的保护及场景。

参考文献

- [1] 尹项根. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护的影响[C] // 中国智能电网学术研讨会, 2018.
- [2] 朱韬析, 张敏, 郭卫明, 等. 南方电网直流输电工程换流变压器保护系统运行问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 140-143.
ZHU Taoxi, ZHANG Min, GUO Weiming, et al. Analysis of the protection systems of converter transformers used in HVDC transmission projects in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 140-143.
- [3] 李勇, 苏钟焕, 王然丰, 等. 高压内置型高阻抗变压器励磁涌流计算分析[J]. 变压器, 2017, 54(8): 1-5.
LI Yong, SU Zhonghuan, WANG Ranfeng, et al. Calculation and analysis of magnetizing inrush current of high impedance transformer with built-in high voltage winding[J]. Transformer, 2017, 54(8): 1-5.
- [4] 李晓华, 罗龙波, 谢金泉, 等. 高压内置型高阻抗变压器涌流特性对保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 108-114.
LI Xiaohua, LUO Longbo, XIE Jinquan, et al. Impact of inrush current characteristics of high-voltage built-in high-impedance transformer on relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 108-114.
- [5] 张召峰, 孙庆森, 张海峰, 等. 变压器励磁涌流中的信息熵识别[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 107-111.

- ZHANG Shaofeng, SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, et al. Identification of information entropy in transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 107-111.
- [6] 孙庆森, 张海峰, 王猛, 等. 小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 121-125.
SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng, et al. Application of wavelet algorithm in the transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 121-125.
- [7] 陈继瑞, 张营伟, 刘洁, 等. 一种变压器保护采样可靠性及涌流识别方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 166-170.
CHEN Jirui, ZHANG Yingwei, LIU Jie, et al. A research of transformer protection about sampling reliability and inrush current identification[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 166-170.
- [8] 方榆冬, 徐习东, 朱炳铨. 变压器涌流对零序电流保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 115-118.
FANG Yudong, XU Xidong, ZHU Bingquan. Influence of transformer inrush on zero-sequence current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 115-118.
- [9] ETO J. CERTS: consortium for electric reliability technology solutions-research highlights[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2003.
- [10] "GRID 2030". A national vision for electricity's second 100 years[R]. United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution, 2005.
- [11] JIANG K, SING C. Reliability modeling of all-digital protection systems including impact of repair[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 579-587.
- [12] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔可夫状态空间法的超高压电网继电保护系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
ZHANG Xuesong, WANG Chao, CHENG Xiaodong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state-space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99.
- [13] 王勇, 韩学山, 丁颖, 等. 基于马尔科夫链的电力系统运行可靠性快速评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 405-410.
WANG Yong, HAN Xueshan, DING Ying, et al. Markov chain-based rapid assessment on operational reliability of power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 405-410.
- [14] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 105-113.
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 105-113.
- [15] BERESH R, CIUFO J, ANDERS G. Basic fault tree analysis for use in protection reliability[J]. International Journal of Reliability and Safety, 2008, 2(1): 64-78.
- [16] 葛少云, 王浩鸣, 徐栋. 基于蒙特卡洛模拟的分布式风光蓄发电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 39-44.
GE Shaoyun, WANG Haoming, XU Li. Reliability evaluation of distributed generating system including wind energy, solar energy and battery storage using Monte Carlo simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 39-44.
- [17] 沈智健, 卢继平, 赵渊, 等. 阶段式电流保护运行风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 70-77.
SHEN Zhijian, LU Jiping, ZHAO Yuan, et al. Operational risk evaluation model of stepped current protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 70-77.
- [18] 沈智健, 周家启, 卢继平, 等. 距离保护运行风险评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 7-11.
SHEN Zhijian, ZHOU Jiaqi, LU Jiping, et al. Operational risk evaluation model of distance protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 7-11.
- [19] 王焯, 闫奇, 戴志辉, 等. 零序电流保护运行风险评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 16-20.
WANG Zhuo, YAN Qi, DAI Zhihui, et al. Operational risk evaluation model of zero sequence current protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 16-20.
- [20] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-11-15

作者简介:

王友怀(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

张浩(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及自动化;

周虎兵(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 许威)