

12-1-2022

Assessment of distribution line zero-sequence overcurrent protection inrush maloperation risk and corresponding countermeasure with 5G

Ye Peng

China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China

Zhen Jin

Nari-relay Engineering and Technique Co., Ltd., Nanjing 211102, China

Hongshan Chen

China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China

Shu Xu

Nari-relay Engineering and Technique Co., Ltd., Nanjing 211102, China

Changbing Luo

China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

Peng, Ye; Jin, Zhen; Chen, Hongshan; Xu, Shu; Luo, Changbing; Hou, Wei; He, Jinfeng; and Chen, Jun (2022) "Assessment of distribution line zero-sequence overcurrent protection inrush maloperation risk and corresponding countermeasure with 5G," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 37: Iss. 5, Article 11.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.011

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss5/11>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Assessment of distribution line zero-sequence overcurrent protection inrush maloperation risk and corresponding countermeasure with 5G

Authors

Ye Peng, Zhen Jin, Hongshan Chen, Shu Xu, Changbing Luo, Wei Hou, Jinfeng He, and Jun Chen

配电线路零序过流保护涌流误动风险评估及 借助 5G 的应对策略研究

彭 业¹, 金 震², 陈宏山¹, 徐 舒², 罗长兵¹, 侯 炜², 何进锋¹, 陈 俊²

(1.中国南方电网有限责任公司,广东 广州 510080;2.南京南瑞继保工程技术有限公司,江苏 南京 211102)

摘 要:高压内置型高阻抗变压器空载合闸中会产生幅值较高的零序涌流,其可能会经相邻变压器渗透至经小电阻接地的 20 kV 配电网络中,引发配网线路零序过流保护误动,进而导致用户失电。针对这一问题,首先结合零序涌流的半解析表达式,对高压内置型高阻抗变压器的零序涌流幅值特征进行量化分析;然后依托 PSCAD/EMTDC 平台验证了模型的有效性和保护误动的可能性;最后基于 Matlab 编写配网线路零序过流保护的误动风险评估程序,结合变压器和保护的实际参数,量化高压内置型高阻抗变压器空载合闸工况下相邻配网线路零序过流保护的误动概率。计算结果明确零序过流保护在高压内置型高阻抗变压器空载合闸期间的动作情况,在此基础上,提出一种借助 5G 通信技术的零序过流保护涌流闭锁策略,并分析该策略的可行性。

关 键 词:配电网;零序涌流;零序电流保护;风险分析;5G 无线通信技术

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.011 中图分类号:TM740 文章编号:1673-9140(2022)05-0100-09

Assessment of distribution line zero-sequence overcurrent protection inrush maloperation risk and corresponding countermeasure with 5G

PENG Ye¹, JIN Zhen², CHEN Hongshan¹, XU Shu², LUO Changbing¹,
HOU Wei², HE Jinfeng¹, CHEN Jun²

(1.China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2.Nari-relay
Engineering and Technique Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The high zero-sequence inrush will be caused when the high-voltage built-in high-impedance transformer performs no-load closing, which may penetrate into the 20 kV distribution network with a grounding small resistance through the adjacent transformers, leading to the maloperation of zero-sequence overcurrent protection of distribution lines. This will result in the power loss of users. To solve this, the amplitude characteristics of high-voltage built-in high-impedance transformers are analyzed based on zero-sequence inrush formula. Then, the validity of the model and the possibility of protection maloperation are studied based on PSCAD/EMTDC simulation platform. At last, the calculation procedure for assessing risks of zero-sequence over-current protection in distribution networks is produced by MATLAB, where the actual parameter is used to quantitatively analyze the maloperation probability of zero-sequence overcurrent protection when a high-voltage built-in high-impedance transformer performs no-load energize. The exper-

收稿日期:2021-04-05;修回日期:2021-09-07

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(0000002020030103XT00046)

通信作者:金 震(1977—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统继电保护研究;E-mail:jinz@nrec.com

rienmental results indicate protection operation situations. A protection blocking strategy based on 5G wireless communication technology is proposed and its feasibility is analyzed.

Key words: distribution network; zero-sequence inrush; zero-sequence current protection; risk analysis; 5G wireless communication technology

受铁芯饱和的影响,变压器空载合闸会产生励磁涌流。由于三相合闸条件不同,三相绕组中所产生的涌流呈现不对称特性,进而会在零序回路中产生零序涌流。该零序涌流会在电力系统的零序网络中分配,若其流经保护安装处时幅值超过零序过流保护动作门槛,就会导致保护误动。一般而言,普通变压器的零序涌流幅值较低,往往不会导致上述误动问题。当在整定门槛非常灵敏等极端工况下,误动现象才偶有发生。但是,高压内置型高阻抗变压器(高压内置变)的广泛应用使得上述问题日趋严重^[1]。

对于配电系统而言,其通常采用中性点不接地或者经消弧线圈接地的方式,且降压变通常选为 YNd11 型接线方式,因此变压器空载合闸过程中所产生的零序涌流不会对配电网的零序过流保护产生不利影响。但是随着经济的快速发展,电力负荷快速增长,10 kV 配电网系统损耗大、容量小、工程用地约束等缺陷逐渐凸显,20 kV 系统的出现和推广成为必然,常应用于负荷密度较高的新兴城市的工业区^[2]。目前 20 kV 配电系统较多采用经小电阻接地的方式,原因如下^[2-3]:

- 1) 保护能够可靠跳开故障线路;
- 2) 降低设备的耐绝缘水平,节省电缆投资;
- 3) 有利于将 10 kV 线路升压至 20 kV 运行,减少建设时间和资源浪费。

此外,考虑到为保证电压质量、降低线路损耗,城市电网改造工程将 220 kV 电压等级直接引入负荷中心。在上述电网接线及运行场景下,高压输电网所产生的零序涌流即会经过 220 kV/20 kV 降压变而流入配电网。此时不仅上游高压输电线路的零序过流保护存在误动可能,20 kV 配电线路的零序过流保护也很可能发生涌流类误动。目前,对于与高压内置变直接相连的高压输电线路零序过流保护误动问题,已有多位学者进行了深入研究,并提出了相应的保护应对方案,但对于中性点可能

经小电阻接地的配电线路零序保护误动问题,其应对措施还鲜有研究。

尽管从原理上对保护性能进行改进可彻底解决上述误动问题,但是否需要对保护进行针对性改进,应综合考虑降低保护误动风险和力求保护配置简单化这 2 种因素。因此,对变压器空载合闸期间配电网线路零序过流保护误动风险进行评估具有重要的现实意义。现有的风险分析大多以负荷损失为目标,预测系统在保护装置失效的情况下可能承受的风险^[4-5]。事实上,零序涌流引发的零序过流保护误动事件为保护原理无法适应变压器空载合闸工况所致,涌流大小直接决定了保护的误动风险^[6]。若能够遍历计算高压内置变的零序涌流,即可进一步量化分析此类变压器空载合闸所引发的配网线路零序过流保护误动概率。尽管基于 PSCAD 平台可准确模拟高压内置变空载合闸场景^[7],但由于其进行变压器仿真时,需要手动输入合闸条件,不具备遍历计算各种合闸条件下涌流数据的可行性,因此,难以直接用 PSCAD 对高压内置变零序涌流所引发配网线路零序过流保护误动概率进行量化计算。

此外,针对就地化零序涌流识别方法,目前已有大量的研究成果,但均仅限于理论分析阶段^[8-10],工程实际中所应用的零序过流保护装置均未添加可用的零序涌流闭锁措施。若可采用外部闭锁方式,在变压器空载合闸时,考虑到灵敏段零序过流保护的延时,将合闸信号以通信手段发送至配网零序过流保护以实现闭锁,则无需替换原有的保护装置或大幅改动原有的保护算法,在点多面广的配电网中,将具有较好的工程实用价值。在上述解决方案中,可靠便捷的通信网络是实现合闸闭锁信号传输以及保护方案能否推广应用的关键所在。

光纤通信方式投资大,施工和维护困难,目前覆盖的范围仅包含了城市电网高价值用户,并不适合大规模应用于配电系统。电力线载波通信由于

电力线本身的脉冲干扰等原因,通信的可靠性较低^[11-12]。4G 等无线通信方式的时延长,平均在 100 ms 以上,以其为基础发送闭锁信号难以和保护的延时特性相配合^[13]。综上所述,传统的通信方式都难以为合闸闭锁信号的传输提供技术支撑。

作为新一代的移动通信技术,5G 通信在传输时延、系统安全性等方面有了显著提高。截至目前,全国已完成 60 万座 5G 基站的建设工作,预计未来三、五年内,5G 基站的建设数量可达 300 万座。5G 通信支持信号集中到一个准确且狭小的范围内,让终端避免了其他电波的干扰,非常适合于地域分布广泛的电力自动化设备^[14-15]。因此,5G 技术在电力系统,尤其是配电网保护控制领域的应用是未来发展的必然趋势,也为上述方案中合闸闭锁信号的远距离可靠传输提供了可能。

鉴于此,本文基于合理的零序涌流表达式编写计算程序,遍历计算所有可能合闸工况的高压内置变零序涌流数据,定量计算配电网 20 kV 线路零序过流保护在高压内置变空载合闸期间的误动概率,可为配电网工程建设及保护改造提供理论指导。在此基础上,对误动风险较大的零序过流保护提出一种借助 5G 通信的涌流闭锁策略,基于 PSCAD 仿真平台验证其可行性和有效性。

1 零序涌流半解析模型

单相变压器空载合闸时等效电路如图 1 所示, $u(t)$ 为交流电源, R_s 和 L_s 为等效电源的内阻和电感, R_{1s} 和 L_{1s} 表示一次侧绕组电阻与漏电感, R_m 和 L_m 为等效励磁电阻与电感。

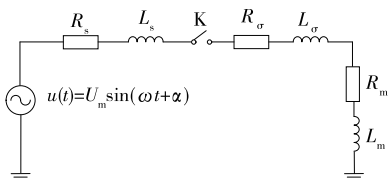


图 1 变压器空载合闸等效电路

Figure 1 Equivalent circuit of Transformer no-load closing

变压器近似磁化曲线如图 2 所示。图 2 中, L_{air} 为空心电感, Φ_s 为变压器的饱和磁通点, 据此进一步对变压器励磁涌流表达式进行分析。

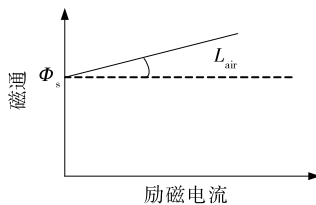


图 2 近似磁化曲线

Figure 2 Approximate magnetization curve

设 $t=0$ 时刻变压器空载合闸, 合闸角为 α , $R = R_s + R_{1s} + R_m$, $L = L_s + L_{1s} + L_m$, y_i 为变压器铁芯剩磁。变压器空载合闸时励磁涌流表达式为

$$i_{\mu}(t) = \begin{cases} 0, & \Phi(t) < \Phi_s \\ \frac{-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) - N\Phi_s}{N \cdot L_{air}} + \frac{\psi_{dc} e^{-\frac{t}{\tau}}}{N \cdot L_{air}}, & \Phi(t) > \Phi_s \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$ 为稳态磁链, 幅值 $\psi_m = \frac{\omega L U_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}$, 阻抗角 $\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$, $\psi_{dc} e^{-\frac{t}{\tau}}$ 为暂态磁链, 时间常数 $\tau = L/R$, Φ_s 为饱和磁通点, N 为变压器线圈匝数。

对于三相变压器而言, 当三相断路器同时合闸时, 设 A 相合闸角为 α , 三相合闸角各差 120° , 三相直流磁链分别为 $\psi_{dcA} e^{-\frac{t}{\tau}}$, $\psi_{dcB} e^{-\frac{t}{\tau}}$ 和 $\psi_{dcC} e^{-\frac{t}{\tau}}$, $\Phi_A(t)$, $\Phi_B(t)$ 和 $\Phi_C(t)$ 分别为三相磁通随时间变化的函数。则三相涌流表达式^[6]为

$$i_{\mu A}(t) = \begin{cases} 0, & \Phi_A(t) < \Phi_s \\ \frac{-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) - N\Phi_s}{N \cdot L_{air}} + \frac{\psi_{dcA} e^{-\frac{t}{\tau}}}{N \cdot L_{air}}, & \Phi_A(t) > \Phi_s \end{cases} \quad (2)$$

$$i_{\mu B}(t) = \begin{cases} 0, & \Phi_B(t) < \Phi_s \\ \frac{-\psi_m \cos(\omega t + \alpha - 120) - N\Phi_s}{N \cdot L_{air}} + \frac{\psi_{dcB} e^{-\frac{t}{\tau}}}{N \cdot L_{air}}, & \Phi_B(t) > \Phi_s \end{cases} \quad (3)$$

$$i_{\mu C}(t) = \begin{cases} 0, & \Phi_C(t) < \Phi_s \\ \frac{-\psi_m \cos(\omega t + \alpha + 120) - N\Phi_s}{N \cdot L_{air}} + \frac{\psi_{dcC} e^{-\frac{t}{\tau}}}{N \cdot L_{air}}, & \Phi_C(t) > \Phi_s \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \psi_{dcA} = \psi_{rA} + \psi_m \cos \alpha \\ \psi_{dcB} = \psi_{rB} + \psi_m \cos(\alpha - 120^\circ) \\ \psi_{dcC} = \psi_{rC} + \psi_m \cos(\alpha + 120^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中 ψ_{rA} 、 ψ_{rB} 、 ψ_{rC} 分别为三相铁芯剩磁。

变压器所产生的零序涌流为三相励磁涌流之和,对于 YNd11 型接线的高压内置变来说,零序涌流由合闸侧绕组中的零序电流和三角侧绕组中的环流组成^[8]。因此根据图 3 所示的变压器零序等效电路及基尔霍夫电流定律,就可得到流入系统的零序电流为

$$3i_0^* = (i_{\mu A}^* + i_{\mu B}^* + i_{\mu C}^*)L_{2\sigma}^*/(L_{s0}^* + L_{2\sigma}^* + L_{1\sigma}^*) \quad (6)$$

其中, $L_{1\sigma}^*$ 、 $L_{2\sigma}^*$ 分别为一次侧和二次侧的漏感, L_{s0}^* 为系统零序电感。

由于三相铁芯饱和时刻及程度不同,基于数学物理方法所推导得到的零序涌流公式是一个多分段函数,难以用导数等纯数学方法直接得到零序涌流的极值点及其随时间变化的规律。其次,零序涌流表达式所描述的是随时间变化的电流瞬时值,而保护判据中进行判断的是基波有效值,因此也难以直接用数学推导的形式得到零序涌流基波幅值随时间变化的表达式。鉴于此,在已知合闸条件的基础上,可基于式(2)~(4),编写涌流计算程序和后续定量分析的计算程序,定量分析零序涌流特征,这种理论推导与程序相结合的计算方法称为零序涌流半解析计算模型。进一步地,基于上述程序,遍历计算各种可能合闸条件下的零序涌流瞬时数据并对其进行傅里叶变换,得到大量合闸场景下的零序涌流基波幅值。

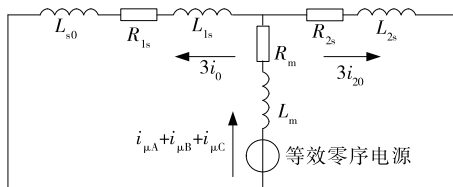


图 3 零序电路

Figure 3 Zero sequence circuit

为验证上述半解析模型的有效性,采用广州供电局航云 220 kV 变电站变压器空载合闸时的现场录波数据,将基于式(2)~(4)的计算结果与其进行了比较。根据录波数据可知,该次空载合闸的合闸

角为 210° ,三相剩磁为 $(0.1, 0.45, -0.55)$ p.u.。将上述合闸条件代入半解析模型计算程序可得零序涌流波形,如图 4 中黑色实线所示,为便于对比分析,将现场录波数据在图 4 中采用黑色虚线标示。由图 4 中曲线对比可知,根据半解析模型计算得到的零序涌流波形与现场录波极为吻合。为了进一步说明两波形的相似程度,分别计算 2 条零序涌流波形的二次谐波含量及间断角,结果如表 1 所示。由表 1 计算可知,上述 2 种情况下零序涌流特征量的误差不到 7%,完全可满足保护原理设计和分析的精度要求,验证了零序涌流半解析理论模型的准确性。

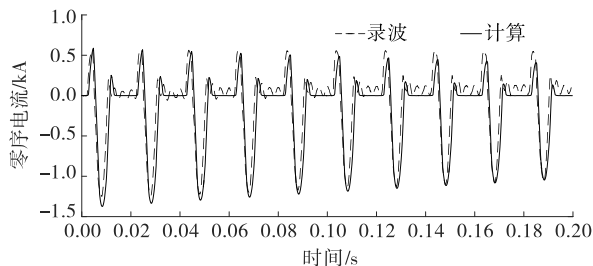


图 4 录波数据与计算结果对比

Figure 4 Wave comparison between recorded data and calculated results

表 1 录波数据和计算结果的二次谐波含量及间断角误差

Table 1 Error of second harmonic component and dead angle between record and calculation result

数据类别	二次谐波含量/%	谐波含量相对误差/%	间断角/(°)	间断角含量相对误差/%
计算结果	97.8	6.1	247.5	1.1
录波数据	104.1	6.1	244.8	1.1

2 变压器空载合闸期间零序涌流计算方案

针对特定合闸条件,高压内置变空载合闸是否会引起线路零序过流保护误动与涌流幅值有着直接关系。因此若要分析高压内置变空载合闸引发的保护误动风险,首先需明确各合闸场景下零序涌流幅值大小。为此,基于式(2)~(4)编写涌流数据生成程序,进行各种可能合闸场景下的零序涌流批量化计算,具体步骤如下。

- 1) 输入式(2)~(4)中所给出的各变压器参数。
- 2) 设置 A 相合闸角及三相剩磁。A 相合闸角

的范围为 $[0, 360^\circ]$,三相剩磁的范围均为 $[-1, 1]$ p.u.。确定合闸角和剩磁的步长,对连续合闸角及三相剩磁条件进行离散,对离散后的合闸角与剩磁条件进行组合,得到需遍历计算的合闸场景。

3)将预先设置好的合闸场景结合各变压器参数代入式(2)~(4)中,基于 Matlab 编写的计算程序,计算零序涌流数据并提取零序涌流基波分量。

在计算过程中暂未考虑三相剩磁在数量间的关系,变压器合闸条件实际为包含合闸角及 A、B、C 三相剩磁这 4 个变量的四维矩阵,难以用图表的形式直观描述涌流大小与合闸条件间的规律。为此,以 $\psi_{rA} = -\psi_{rB} = -\psi_{rC}$ 和 $\psi_{rA} = -0.5\psi_{rB} = -0.5\psi_{rC}$ 这 2 种剩磁工况为例^[16],绘制描述 A 相合闸角及剩磁这 2 个变量与零序涌流幅值之间关系的图形,便于展开分析。

两类变压器的零序涌流基波幅值随合闸条件的变化规律如图 5、6 所示。由图 5、6 可知,分布图由 4 个对称区域组成,故仅分析其中任一区域。两类变压器空载合闸零序涌流幅值达到最大,分别为 2.240、1.259 p.u.。此时合闸条件为 A 相合闸角为 110° ; A、B、C 三相剩磁分别为 $-1, 1, 1$ p.u.。这一合闸条件也是步骤 2)中令零序涌流幅值达到最大的合闸条件。对比可知,高压内置变的涌流幅值近

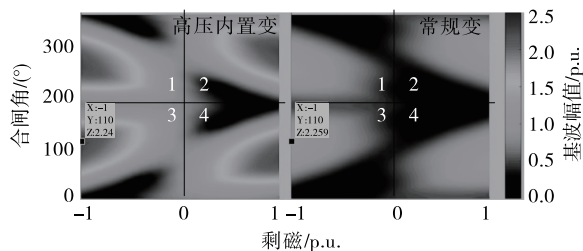


图 5 非平衡剩磁下的零序电流基波幅值

Figure 5 Fundamental current amplitude of zero-sequence inrush when the three phase remanence is unbalanced

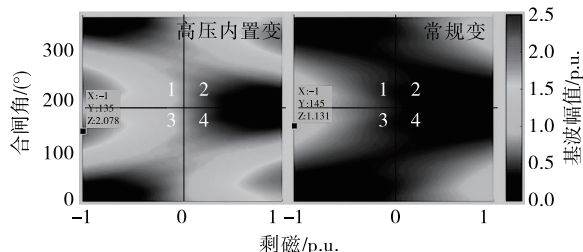


图 6 平衡剩磁下的零序电流基波幅值

Figure 6 Fundamental current amplitude of zero-sequence inrush when the three phase remanence is balanced

似为常规变的 2 倍。剩磁工况改变后,零序涌流的基波幅值有所下降,但在相同的合闸条件下,高压内置变的零序涌流始终高于常规变。

当合闸变压器的母线上连接有 多条零序电流流通的线路时,只需依不同回路零序阻抗的反比分配总零序涌流,即可得到相应的零序涌流大小。上述模型的准确性已经在文献[5]中得以验证,本文不再赘述。

由后续分析可知,高压内置变空载合闸产生的零序涌流在系统中分配后更易引发与之相连的 20 kV 配电网线路零序过流保护误动作,下面即对这一现象展开研究。

3 算例分析及对策初探

仿真模型如图 7 所示。 G_1 为系统等值电源, T_1 为空投的 YNd11 型高压内置变,各绕组电压等级分别为 220、35、10 kV。 T_2 为 220 kV/20 kV 变压器,采用 YNd11 连接方式,高压侧直接接地,低压侧由于是城市电缆线路,需经 5Ω 小电阻接地。在正常工况下断路器 $S_2 \sim S_7$ 闭合,系统向负荷 L 供电。变压器 T_1 的高中、高低以及中低阻抗分别为 13.5%、29%、18%。输电线路采用电缆模型, l_1 和 l_2 的长度均设为 5 km。

针对高压内置变 T_1 空载合闸期间, S_6 处的零序过流保护动作情况进行仿真分析。根据三段式零序电流保护整定原则^[17-19],零序过流保护 III 段依照躲开下级线路出口处三相短路产生的不平衡电流进行整定,即

$$I_{set}^{III} = K_{rel} K_{aper} K_{st} f_i I_{unb, max} \quad (7)$$

式中 K_{rel} 为可靠系数,取为 1.25; K_{aper} 为非周期分量系数,取为 1.5; K_{st} 为电流互感器的同型系数,取

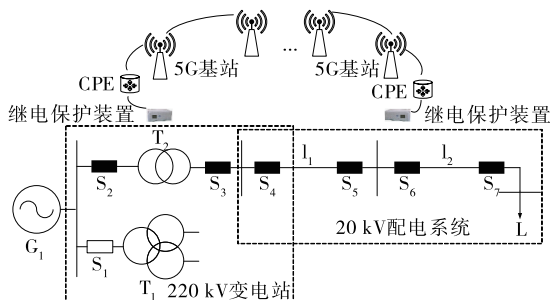


图 7 仿真模型

Figure 7 Simulation model

为 0.5; f_i 为电流互感器的误差系数, 取为 10%; $I_{\text{unb,max}}$ 为下级线路出口处三相短路产生的最大不平衡电流。

根据式(5)设定线路 l_2 的零序过流保护整定值为 $I_{\text{set}}^{\text{III}}=65\text{ A}$, 同时整定延时设为 $t_{\text{set}}^{\text{III}}=1\text{ s}$ 。

3.1 高压内置变空载合闸工况下配电网线路零序过流保护保护误动可能性验证

设 0.206 s 时, 断路器 S_1 合闸, 此时高压内置变 A 相的合闸角约为 110° , 三相剩磁为 1、-1、-1 p.u.。线路 l_2 侧零序电流及其基波分量波形如图 8 所示, 此时线路中的零序电流基波幅值约为 110 A, 超过零序过流保护 III 的整定值 65 A, 因此线路零序过流保护启动, 在合闸后 1 s(时间轴 1.22 s), 零序电流幅值仍旧处于整定门槛之上, 依照保护动作原理, 线路 l_2 的零序过流保护 III 段动作, 下游负荷失电。修改高压内置变的投运条件进行多组仿真模拟, 配电线路零序过流保护动作情况如表 2 所示。

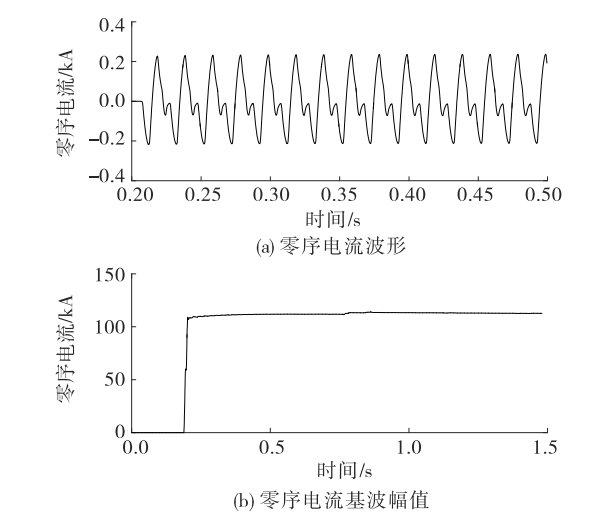


图 8 高压内置空载合闸期间 20 kV 线路零序电流波形

Figure 8 Zero-sequence current wave in a 20 kV line after the transformer is no-load energized

表 2 空载合闸期间配电线路零序过流保护动作情况统计

Table 2 Zero-sequence over-current line protection results after the transformer is no-load energized

合闸条件		保护动作情况
合闸角/(°)	三相剩磁/p.u.	(“√”未误动; “×”误动)
110	-1,1,1	×
0	0,0,0	√
30	0.9,-0.9,-0.9	√
60	0.8,-0.4,-0.4	√
90	0.7,-0.7,-0.7	×
150	-0.8,0.4,0.4	×

结合上述仿真计算结果可知, 零序涌流会通过经小电阻接地的变压器渗透至配电侧, 且在某些合闸工况下高压内置变的零序涌流幅值会达到较高的幅值, 引发 20 kV 线路零序过流保护误动作。

3.2 20 kV 线路零序过流保护在高压内置变空载合闸期间的误动风险分析

以上述分析为基础, 以所有合闸场景下线路零序过流保护的误动概率为指标, 按照文第 2 节所述步骤对高压内置变空载合闸过程中 20 kV 线路零序过流误动风险进行评估。具体参数设置如下:

1) 高压内置变的空心电感为 0.11 H, 衰减时间常数 0.94 s;

2) 分别以 5° 和 0.1° 为步长选取合闸角和三相剩磁, 共生成 67 万种合闸场景;

采用傅里叶变换提取上述合闸场景下的零序涌流基波分量, 并将判断其是否超过 20 kV 线路零序过流保护的定值, 统计保护误动所对应的合闸条件占比作为保护误动概率。

上述 2 种剩磁关系下, 高压内置变空载合闸期引发 20 kV 线路零序过流保护误动区间如图 9、10 所示。由图 9、10 可知, 剩磁越大, 空载合闸产生的零序涌流越高, 配电网零序过流保护误动概率越高, 因此可以通过消磁装置提前降低乃至消除铁芯剩磁, 可进一步降低配电网线路零序过流保护误动风险。

进一步地, 配电网线路零序过流保护误动风险可基于保护误动工况在所有高压内置变合闸条件中的占比进行评估, 评估结果如表 3 所示。

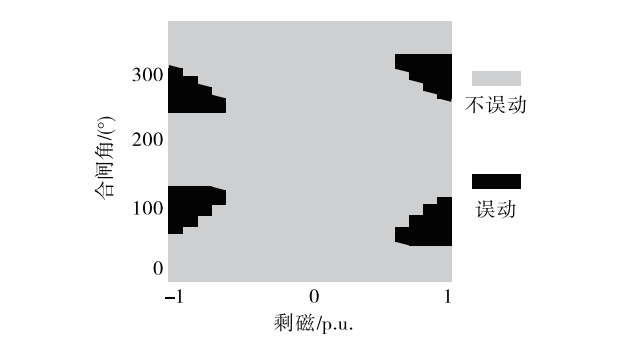


图 9 非平衡剩磁下 20 kV 配电网线路零序过流保护的動作情况分布

Figure 9 Results of 20 kV distributing line zero-sequence over-current protection when the three phase remanence is unbalanced

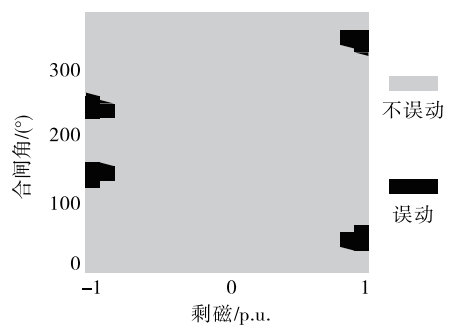


图 10 平衡剩磁下 20 kV 配电网线路零序过流保护的误动情况分布

Figure 10 Results of 20 kV distributing line zero-sequence over current protection when the three phase remanence is balanced

表 3 20 kV 线路零序过流保护的误动概率

Table 1 Maloperation probability of zero-sequence over current protection in 20 kV distributing line

剩磁关系	配电网线路零序过流保护误动概率/%
平衡剩磁	2.65
非平衡剩磁	8.73
不考虑剩磁关系	4.62

由表 3 可知,空载合闸后,20 kV 配电网线路零序过流保护总体的误动概率近 5%。基于上述线路零序过流保护风险评估结果,结合保护配置力求简单的原则,需要为 20 kV 配电网线路配备专门的零序涌流识别判据,以保证配电网线路在上游变压器空载合闸期间能够正常运行,从而保障配电网供电可靠性。

3.3 借助 5G 通信的 20 kV 配电线路零序过流保护涌流闭锁策略的可行性分析

为解决上述高压内置变空载合闸期间导致配电网线路零序过流保护误动的问题,从保护原理出发,存在 2 种添加闭锁判据的可行改进方案。

1)就地化保护改进方案。通过对零序涌流特征(如二次谐波含量)进行提取识别,从而完成保护的闭锁。该方案所采用的电气信号均来自于本站,无需依赖通信网络对信息进行传输,对于新建配电网具有较好的效果。但考虑到存量配电网中线路零序过流保护并未配备相应的识别逻辑,因此该方案的应用需要研发新型保护装置,再对原有的保护装置进行替换,由于配电网点多面广的特点,上述

措施对于存量配网的经济性和可操作性较差。

2)基于通信的广域保护方案。当上游变电站中存在高压内置变空载合闸工况时,由该变电站的继保设备向下游线路发射闭锁信号,通过通信网络将闭锁信号传输至 20 kV 配电网线路零序过流保护装置,进而实现保护闭锁。该方案无需研发新型号的产品,只需在原有保护装置已有的对应开入接点中,接入通信网络传输的闭锁信号即可,对于存量配电网具有较好的实用性。配电网辐射范围广,节点繁多,网络拓扑远比输电网络复杂。考虑到光纤通信成本高,实现配电网全覆盖并不现实,因此,绝大多数配电网终端都适于采用无线网络通信^[18-19],而正如本文所述,5G 通信特别适于配电网的上述无线通信需求。5G 通信具有高带宽、高密度连接、高可靠性、低延时、低功耗等优点,在传输速率、延时等指标上拥有远高于 4G 通信的性能。其中部分关键指标如表 4 所示。

表 4 5G 通信性能指标

Table 4 5G communication performance index

参数	单位	数值
峰值速率	Gbps	下行 20,上行 10
用户体验率	Mbps	下行 100,上行 50
带宽	MHz	≥100
连接密度	设备/km ²	1 000 000
单位面积容量	Mbps/m ²	10
可靠性	—	0.001%丢包率
时延	ms	1
移动速率	km/h	500

下面从实时性和经济性两方面对借助 5G 通信技术的配电线路零序过流保护涌流类闭锁方案可行性进行分析。

当 220 kV 变电站内部有高压内置变空载合闸时,通过保护装置发出闭锁信号,经过若干 5G 基站传输后,被 S₆ 处的接收装置接受,若信号传输时延远小于保护整定时间,则可在保护误动前成功闭锁保护。借助 5G 通信的 20 kV 配电线路零序过流保护添加闭锁判据后的流程与实际动作逻辑分别如图 11、12 所示。

5G 基站的覆盖范围与用户接入密度、基站建设地点、基站功率等因素相关。配电网直接面向用户供电,因此与其距离最近的基站建设地点通常处于

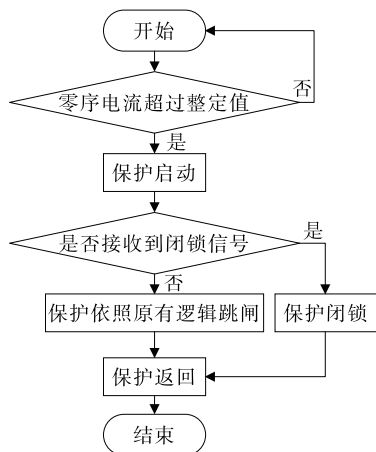


图 11 保护方案策略

Figure 11 Policy graph of protection scheme

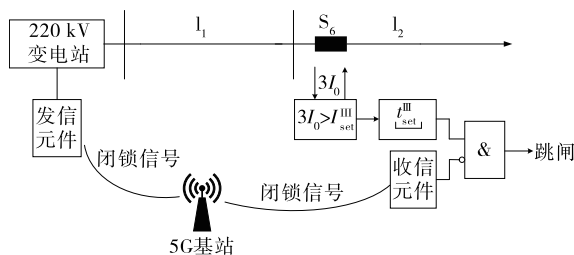


图 12 动作逻辑

Figure 12 Logical graph

建筑较高的城市居民区。当传输闭锁信号需经过的 5G 基站均达到了最大用户连接密度时,每个基站的覆盖范围约为 500 m,将闭锁信号由变电站内部传输至 S_6 处最多需要经过 21 个 5G 基站,其信号时延最长仅为 21 ms。需要特别说明的是,在配电线路 l_1 所穿过的地理区间内,并非所有基站连接密度均达到最大值,当某些地区 5G 的用户连接密度较小或者基站附近的环境较为空旷时,该基站的覆盖范围将大于 500 m,此时信号时延将小于 21 ms。再计及信号的传输时间,闭锁信号经由上游变电站传输至保护安装处的时延最高为 21.034 ms,远小于配线零序过流保护的整定值 1 s,因此在合闸工况下,配电线路零序过流保护误动前即可被有效闭锁,满足保护实时性要求。

从经济性角度分析,该方案经费主要消耗在基站租用和流量计费两方面。除却配网中某些重要功能节点采用光纤通信外,绝大多数配电网络终端均依靠无线网络进行数据传输以实现电量信息数据的采集、上传等工作,因此租用基站用于传输海

量数据是实现配电自动化的必然举措,这一工程背景即为闭锁信号的传递提供技术支撑。在流量计费方面,闭锁信号为开关动作信号,其传输信息量仅为 1 bite,且发信元件当且仅当变电站高压内置变空载合闸和定期通道检测时才会发出闭锁信号,考虑到通信系统中按照通信协议数据帧打包传输的需要,即使按传一次闭锁信号 1 000 bite 流量,对于一个大型城市配网中若有 10 万个终端单元,即使一天发送一次闭锁信息来计算,一个月合计才 3 GB 的数据流量。依照目前 3 元/GB 的 5G 流量收费标准,传输该闭锁信号所花费的流量费用可几乎忽略不计,主要花费只在于基站租用费用。综上,借助 5G 通信技术的 20 kV 线路防涌流类误动方案在经济方面也具备较大的可行性。

4 结语

针对高压内置变空载合闸过程中产生的零序涌流可能引发 20 kV 配电网线路零序过流保护误动问题,本文对配电网线路零序过流保护的涌流类误动风险进行量化分析,形成如下结论:

1)与普通变压器相比,相同空载合闸条件下高压内置变所产生的零序涌流幅值更高,进而 20 kV 配电网线路零序过流保护误动概率更高,因此,在应用高压内置变的场合需要采取针对性措施降低误动风险;

2)通过消磁装置降低甚至消除高压内置变铁芯剩磁,可以一定程度上降低零序涌流幅值,降低配电网线路零序过流保护在上游高压内置变空载合闸期间的误动风险;

3)对于存量配电网,可借助 5G 通信技术,由上游变电站向下游配网零序过流保护发送闭锁信号,该方案满足经济性及实时性的应用要求。

参考文献:

- [1] 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 Jinqian, 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.
- [2] 李甜甜. 20 kV 配电网中性点接地方式与继电保护改造的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [3] 张章, 胡源, 罗涛, 等. 中压直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 109-118.
- ZHANG Zhang, HU Yuan, LUO Tao, et al. Review on research of protection technology for medium voltage DC distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 109-118.
- [4] 任华, 李健, 弥潇, 等. ± 110 kV 吉泉线雷击致灾因子权重分析及高风险杆塔筛选[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 115-124.
- REN Hua, LI Jian, MI Xiao, et al. Analysis of lightning disaster factors and high risk tower identification for ± 110 kV Jiquan line[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 115-124.
- [5] 计丽妍, 李存斌, 贾雪枫, 等. 多证据融合下电力信息物理系统风险评估研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 23-29.
- JI Liyan, LI Cunbin, JIA Xuefeng, et al. Risk assessment of cyber-physical power system based on multi-evidence fusion[J]. Smart Power, 2021, 49(10): 23-29.
- [6] 摆世彬, 田志浩, 刘刚, 等. 高压内置型变压器备自投引发电路零序过流保护误动的风险分析[J]. 变压器, 2021, 58(1): 23-29+67.
- BAI Shibin, TIAN Zhihao, LIU Gang, et al. The risk analysis of zero sequence overcurrent protection maloperation caused by automatic device transfer of transformer[J]. Transformer, 2021, 58(1): 23-29+67.
- [7] 陈蕾, 咸日常, 郑春旭, 等. 系统单相接地故障下接地变压器的运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 56-64.
- CHEN Lei, XIAN Richang, ZHENG Chunxu, et al. Analysis of the operational characteristics of a grounding transformer when there is a single-phase grounding fault of the system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 56-64.
- [8] 张员宁, 黄景光, 张艳华, 等. 利用双重特征量鉴别变压器励磁涌流的高阶统计原理[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 21-30.
- ZHANG Yuanning, HUANG Jingguang, ZHANG Yanhua, et al. High order statistical theory for identifying transformer inrush current by using dual characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 21-30.
- [9] 孙直, 孟润泉, 韩肖清. 微电网与配电网间串联变压器磁饱和抑制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(6): 29-34.
- SUN Zhi, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on magnetic saturation suppression strategy of series transformers between microgrid and distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6): 29-34.
- [10] 王育学, 曹文斌, 黄明辉, 等. 变压器零模涌流解析分析及其等值电路[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3960-3968.
- WANG Yuxue, CAO Wenbin, HUANG Minghui, et al. Mathematical analysis for zero-mode inrush current of transformer and its equivalent circuit[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3960-3968.
- [11] 宋志伟, 徐舒, 王润路, 等. 5G 通信条件下的线路差动保护优化策略研究[J]. 供用电, 2021, 38(5): 17-22.
- SONG Zhiwei, XU Shu, WANG Runlu, et al. Research on optimization strategy of line differential protection under 5G communication conditions[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 17-22.
- [12] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.
- ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [13] 胡光宇, 刘龙, 刘文贵, 等. 5G 在电力系统中的建设方案研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 73-79.
- HU Guangyu, LIU Long, LIU Wengui, et al. A study on 5G construction scheme in electric power system[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 73-79.
- [14] 黄建伟. 5G 移动通信发展趋势与相关关键技术研究[J]. 通讯世界, 2019, 26(8): 116-117.
- HUANG Jianwei. Research on the development trend and related key technologies of 5G mobile communication[J]. Telecom World, 2019, 26(8): 116-117.