

配电网继电保护信号传输延时补偿方法

刘晓琦

(国网武汉供电公司)

摘要：继电保护系统需要及时检测故障并切断故障区域，以防止故障扩散和损害其他设备。然而，信号传输过程中存在延时，为了提高配电网继电保护信号传输延时计算性能，进行电压前端相位补偿、二次加载整定参数默认信息和配电网继电保护信号传输延时补偿，提出基于离散化的配电网继电保护信号传输延时补偿方法。在离散化粒子群算法中，以信息损失量最小为目标，构建继电保护故障本体模型，完成配电网继电保护信息自适应消缺。分析继电保护信号延迟特性，计算继电保护信号延时，设计一种电压前端相位补偿算法，对缺失电压前端相位进行补偿，根据预设的保护逻辑触发相应的保护动作，完成继电保护信号传输延时补偿。算例结果表明，基于时间差的配电网继电保护信号传输延时补偿方法可以将配电网继电保护信号传输延时计算精度提高到 94% 以上，优化动作时间定值结果，保证继电保护信号传输效果，保证配电网运行稳定性与安全性。

关键词：时间差；信息损失量；继电保护信号；配电网；离散化；延时补偿

0 引言

配电网作为电力系统的重要组成部分之一，其运行环境条件复杂、故障模式多样化^[1]，当电力系统发生故障或异常状况时，通过断开电路、切断电流等措施，可以防止电力设备的进一步损害。为此，相关学者进行大量研究。

余磊等^[2]提出配电网电流保护自适应整定方法，有效解决了电网量测数据丢失问题，优化配电网电流保护性能。但在进行迭代计算的过程中，数据量较大，电力系统的结构、参数和运行状态计算的准确性有待提升。李跃辉等^[3]利用关联信息熵系数，分析常见连锁故障类型及影响因素，建立继电保护定值风险评估模型，评估出继电保护系统的风险概率和风险

程度，但不适用于高比例波动性新能源接入电网、交直流特高压远距离输电以及大量电力电子设备，难以应对复杂配电网环境。习莉等^[4]采用 Firefly 算法快速地求取整定值，使整定值达到最优。但该方法没有考虑配电网环境下的多样化故障，导致电力系统的结构、参数和运行状态分析精度较差。方愉冬等^[5]提出了一种基于改进粒子群算法的带 DG 配网反时限过流保护定值的优化方法，对含有 DG 网络的逆时限过流保护定值进行优化，但是电力系统的结构、参数和运行状态应对灵敏度较差，无法应对多变的继电保护信号。王增平^[6]详细分析了电力系统继电保护与安全控制系统，探讨了新型保护的工作模式，建立了实现信息共享且能良好适用新技术，但是没有考虑

到继电保护信号的传输模式，信息量损失较大。谢百焯^[7]提出了一种基于物联网和传感器技术的电网二次设备信息智能移动系统，针对物联网技术和传感器技术，掌握继电保护设备运行状况及其可靠性，但是无法应对电压信号偏移行为，配电网故障响应的延迟特性难以得到缓解，导致有未知故障模式和异常行为，不能保证电力系统的可靠性和鲁棒性运行。

基于以上研究背景，本文针对配电网继电保护定值，提出一种整定计算方法。在离散化粒子群算法中创新性地引入时间差，以提高继电保护信号的传输质量和参数灵敏性，反复补偿电压前端相位，电压信号出现偏移的问题，通过二次加载整定参数默认信息，进行配电网继电保护信号传输延时补偿，从而确保配电网运行稳定性与安全性。

1 继电保护信号传输延时补偿方法设计

1.1 配电网继电保护信息自适应消缺

根据配电网继电保护动作发生的概率，利用粒子寻优的方式，确定最小信息损失量，将离散化的信息损失量最小为目标，通过分析继电保护性能和判断结果，指导粒子群算法的优化过程。

构建继电保护故障本体模型，表示为：

$$M_{\text{loss}} = \min M(Q[w^*, z^*]) \quad (1)$$

$$Q = [\sigma, w, z] \quad (2)$$

式中， Q 为对继电保护故障的假设； σ 为供电设备在停电情况下的状态向量； w 为继电保护器动作的状态向量； w^* 为与 w 对应的报警信息向量； z 为断路器在跳闸情况下的状态向量； z^* 为与 z 对应的报警信息向量。

根据配电网继电保护过程中离散化的信息量损失，通过各个独立粒子的融合^[8]，对信息损失量进行划分，即：

$$M_{\text{loss}} = M_{\text{loss-1}} + M_{\text{loss-2}} + M_{\text{loss-z}} \quad (3)$$

式中， $M_{\text{loss-1}}$ 为继电保护设备在故障状态下的信息量损失； $M_{\text{loss-2}}$ 为启动状态下的信息量损失； $M_{\text{loss-z}}$ 为跳闸状态下的信息量损失^[9-10]。

采用离散化粒子群算法，对配电网故障状态可信度进行分配，即：

$$\begin{cases} m(\varepsilon) = 0 \\ m(g_k) = \Lambda \sum_{g_i \subseteq g_1 \cup \dots \cup g_c} m_j(g_k), g_k \neq \varepsilon \\ k, i = 1, 2, \dots, c \end{cases} \quad (4)$$

式中， Λ 为继电保护的冲突因子； g_k 为配电网故障状态的可信度^[11-13]； $m_j(g_i)$ 为 g_k 的支持度； c 为继电保护状态类别。

假设 $\forall g_1, g_2 \subset g$ 并且 $m(g_1) = \max[m(g_i)]$ ，如果满足式(5)和式(6)的约束，即可对配电网继电保护进行自适应消缺：

$$m(g_1) > \lambda_1 \quad (5)$$

$$m(g_1) - m(g_2) > \lambda_2 \quad (6)$$

式中， λ_1 和 λ_2 为冲突因子 Λ 的阈值。

1.2 继电保护信号传输延时计算与补偿

在配电网中，两端的设备需要实现精确的时间同步，然而，在配电网环境下，如多路径、丢包等情况，引发电力系统发生故障或异常状况，同时，不同类型和不同程度的故障对电流保护的要求不同，需要根据具体情况进行配置和调整，电压信号出现偏移，电力系统的结构、参数和运行状态受到影响。对此，研究继电保护信号传输延时，并设计一种电压前端相位补偿算法，便于及时根据预设的保护逻辑触发相应的保护动作，如断开电路、切断电流等。

将继电保护的电压互感器和电流互感器定义为 U_r 和 I_r ，根据配电网的继电保护原理，获取继电保护信号传输信号延时分布，表示为：

$$Y = \frac{\partial_s + C}{U_r \times I_r} \times \frac{J}{M^*} \quad (7)$$

式中, ∂_s 为合并单元; C 为向量的测量单元; M^* 为继电保护信号的传输模式; J 为继电保护信号的传输介质。

电压互感器发出继电保护信号之后, 信号从发出到接收会产生一段时间差 Δt , 根据时间差的产生, 计算出继电保护信号相位差 γ 的时间量, 公式为:

$$T' = \frac{\gamma^* t^*}{\Delta t - t_j} + f_g \times f_u \quad (8)$$

式中, t^* 为继电保护信号的额定延时; f_g 为合并单元对信号的处理延时; f_u 为网络传输延时。

在产生时间差的情况下, 可以计算出电压信号的额定相位偏移:

$$p = \frac{t_p \times p_x}{t_o} + \frac{t_f - T_1}{T} + L \quad (9)$$

式中, t_p 为继电保护信号时延; t_o 为传感器信号采样反应延时; p_x 为互感器采集样本数据的相位偏移, t_f 为继电保护信号的发生时延; T 为继电保护的工作周期; T_1 为电流产生的延迟周期; L 为电流回路。

如果继电保护电压信号出现偏移, 导致电压前端相位出现缺失现象, 需要对缺失电压前端相位进行补偿, 通过下式计算:

$$B_j = \frac{I_f + I_g \times I_d}{E_k \times p} \times T' \quad (10)$$

式中, I_f 为继电保护的负荷电流; I_g 为配电网高压侧的相位电流; I_d 为配电网低压侧的相位电流; E_k 为继电保护动作的时限。

对缺失的电压前端相位进行补偿之后, 根据预设的保护逻辑触发相应的保护动作, 能够保证配电网继电保护信号顺利传输, 具体为:

$$R = \frac{N_d + Y}{\chi_k} \times \frac{B_j \times p}{T'} \quad (11)$$

式中, χ_k 为相位补偿的角度越限; N_d 为缓冲区数。

结合继电保护动作触发流程, 继电保护信号传输延时计算与补偿流程如图 1 所示。

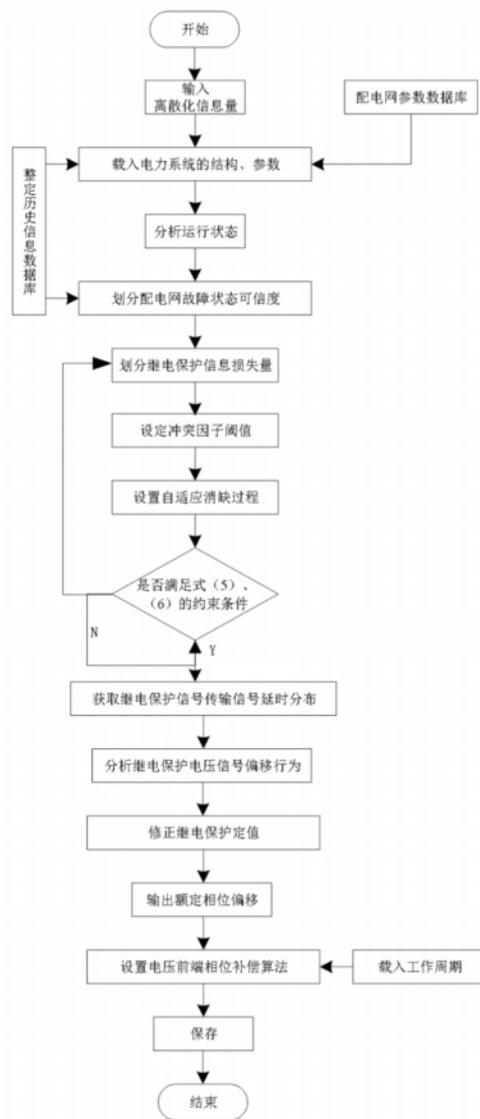


图 1 继电保护信号传输延时计算与补偿流程

图 1 中, 根据保护动作值 (如各种测量元件的门槛值、告警的门槛值等)、保护对象参数定义 (如距离保护必须有该继电保护器保护线路的长度、线路零序电抗、正序电抗、零序电阻、正序电阻等)、保护输出定义 (如继电保护器跳闸合闸、异常告警等关键

信息) 以及保护录波记录定义 (如故障录波的时间、事件信息的定义等), 作为电力系统结构、参数和运行状态, 逐步划分继电保护信息损失量, 结合自适应消缺过程与约束条件, 分析继电保护电压信号偏移行为, 载入工作周期后, 设置电压前端相位补偿算法, 完成继电保护信号传输延时计算与补偿。

2 算例实验

应用 IEEE 14 节点配电系统, 进行算例分析, 为了验证基于时间差的配电网继电保护信号传输延时补偿方法在配电网继电保护信号传输延时计算中的性能, 以图 2 的拓扑结构为研究对象, 设置一次算例实验。

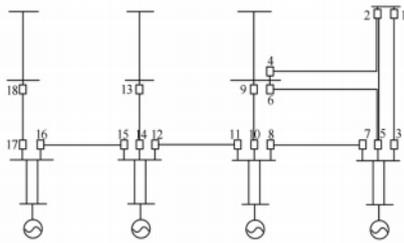


图 2 IEEE 14 节点配电系统

当任意一个保护不能满足配电网的灵敏度和级差要求时, 需要附加 2s 的惩罚时间, 此时时间级差取 0.6s。在粒子群算法中, 设置如下参数: 粒子总数: 100 个, 交叉概率: 0.8, 变异概率: 0.001, 最大迭代次数: 100, max step: 20。

对于配电网继电保护装置而言, 与相邻保护配合的时间定值和保护级差的时间定值是相等的, 因此在配电网中, 设置约束区间编码, 如图 3 所示。

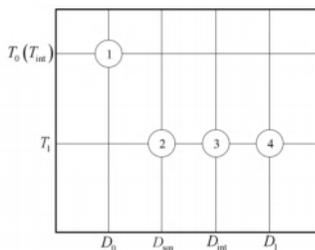


图 3 约束区间优化编码

图 3 中, D_0 为与 1 号防护装置的作用定值; D_{sen} 为确保灵敏度的行为定值; D_{int} 为确定级别差值的作用定值; D_1 为与 2 号防护装置的作用定值; T_0 为与 1 号防护装置的时间定值; T_{int} 为保证级差的时间定值; T_1 为与 2 号防护装置的时间定值。

获取继电保护信号传输延时数据, 并进行补偿, 优化保护策略和网络通信配置, 根据预设的保护逻辑触发相应的保护动作, 得到动作时间定值如表 1 所示。

表 1 动作时间定值结果

保护编号	动作时间/s	保护编号	动作时间/s
2	0.6	11	0.6
3	1.0	12	0.8
4	1.0	13	1.0
5	1.4	14	0.6
6	1.2	15	0.8
7	0.8	16	1.0
9	0.6	17	0.6
10	0.6	18	1.8

根据表 1 可知, 本文方法可以结合电力系统的结构、参数和运行状态, 记录故障信息和保护动作信息, 优化动作时间定值结果, 避免由于延时过长或波动导致的保护误动或拒动。

为了突出基于时间差的配电网继电保护信号传输延时补偿方法的优势, 引入基于 Firefly 算法的计算方法 (文献 [4] 方法) 和基于改进粒子群算法的计算方法 (文献 [5] 方法) 作对比, 测试保护 1~ 保护 18 的配电网继电保护信号传输延时计算精度, 测试结果如图 4 所示。

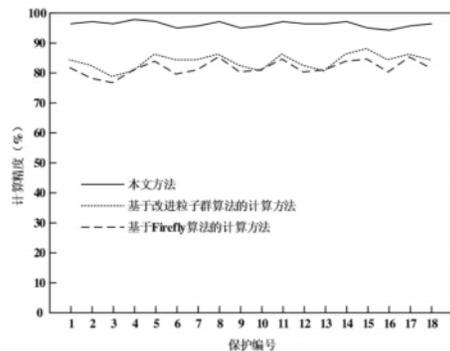


图 4 继电保护信号传输延时计算精度

根据图4可知,采用基于Firefly算法的计算方法和基于改进粒子群算法的计算方法时,配电网继电保护信号传输延时计算精度在90%以下,而基于时间差的配电网继电保护信号传输延时补偿方法可以将计算精度提高到94%以上,保证了配电网的稳定运行。

3 结束语

本文通过继电保护信号传输延时计算方法,结合粒子群算法和自适应消缺过程,创新性地引入损失量和时间差,补偿继电保护信号传输延迟,有效地提高了配电网的稳定性和故障防护能力,避免配电网出现故障,并显著提高继电保护信号传输延时计算精度,当电力系统发生故障或异常状况时,提升继电保护装置响应效率。

参考文献

- [1] 孙荣智,王承力,王子驰,等.多分支低压电网的故障区段自动定位技术研究[J].微型电脑应用,2022,38(6):57-59,64.
- [2] 余磊,贾科,温志文,等.计及量测数据丢失的主动配电网电流保护自适应整定方法[J].电力系统自动化,2022,46(15):145-152.
- [3] 李跃辉,方愉冬,徐峰,等.基于关联数据挖掘的继电保护定值风险评估方法研究[J].科学技术与工程,2023,23(24):10355-10361.
- [4] 刁莉,梁庆光.基于Firefly算法的多回路配电网继电保护整定计算方法研究[J].机械与电子,2022,40(5):17-20,24.
- [5] 方愉冬,徐峰,李跃辉,等.基于改进粒子群算法的含DG配网反时限过流保护定值优化方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):13-19.
- [6] 王增平,林一峰,王彤,等.电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):10-20.
- [7] 谢百煌,李旭辉.基于物联网和传感器技术的电网二次设备信息智能移动系统[J].制造业自动化,2023,45(8):12-16,27.
- [8] 刘雅杰,谢金莲,赖沛鑫,等.基于HSR的地铁供电系统跨站网络化保护方案[J].城市轨道交通研究,2023,26(9):252-258.
- [9] 张晨浩,闫吉飞,吕艺超,等.不依赖电源特性的交流线路单端量保护[J].电力系统自动化,2023,47(22):33-43.
- [10] 邱银锋,李国香,田浩,等.基于ADMM的海上多平台-岸电供能系统能量-备用协同分布式优化调度[J].电力建设,2023,44(1):21-29.
- [11] 翟博龙,唐志军,宋福海,等.基于OPNET的保护性能评估及采样值估计算法[J].电测与仪表,2023,60(4):160-166.
- [12] 韩学军.基于深度学习和改进潮流介数的继电保护定值智能校验方法[J].电子器件,2023,46(5):1442-1448.
- [13] 卫泽喆,武家辉,张华,等.基于图形相似度的分布式能源接入配电网差动保护方案[J].科学技术与工程,2023,23(6):2461-2468.

(收稿日期:2024-12-06)