

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417447

噪声扰动下高鲁棒性的扇形电流差动保护研究^{*}曾琦¹ 张皓¹ 何川¹ 黄孝兵²

(1. 四川大学电气工程学院 成都 610065; 2. 强华时代(成都)科技有限公司 成都 610095)

摘要: 在规模化分布式能源接入的新型电力系统背景下, 电流差动保护作为保障电网安全运行的关键技术, 但其动作可靠性会受限于信息传输和保护判据两方面影响。现有关于电流差动保护研究中往往忽视了信息传输扰动这一因素, 这可能导致保护动作性能下降甚至失效。基于 ρ 平面理论, 深入分析了高斯白噪声和脉冲噪声构成的复杂噪声扰动对电流差动保护动作特性的影响, 并提出了一种具有噪声鲁棒性的新型扇形电流差动保护判据。该扇形判据能够灵活设置线路无故障时两端电流的最小相位差 ϕ_{op} 和最小幅值比 R 以实现动态制动区域, 有效提高了系统在噪声扰动下的抗干扰能力和动作可靠性。通过理论分析和仿真验证, 与传统圆形判据相比, 所提扇形判据在不同信噪比条件下均展现出优越的抗误动和抗拒动性能, 在较低信噪比 (30 dB) 的复杂噪声扰动下, 扇形判据相比传统判据误动率下降约 50%, 并可以保证误动率和拒动率均远小于 10^{-5} , 可为新型电力系统中电流差动保护提供一种更具鲁棒性的解决方案, 对于保障新型电力系统的安全稳定运行具有重要的理论和实际意义。

关键词: 配电网; 电流差动保护; ρ 平面; 扇形判据; 噪声扰动

中图分类号: TM77; TN919.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Highly robust sector current differential protection criterion
under noisy disturbance environmentsZeng Qi¹ Zhang Hao¹ He Chuan¹ Huang Xiaobing²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Qianghua Times(Chengdu) Technology Co., Ltd., Chengdu 610095, China)

Abstract: With the development of renewable-energy-dominated power system, current differential protection, a key technology to ensure the safe operation of power systems, has attracted widespread attention regarding its reliability. However, the influence of noise interference in the process of information transmission is often ignored in the existing studies when discussing current differential protection, which may lead to the failure of protection action. Deeply analyzes the influence of complex noise disturbance composed of Gaussian white noise and impulse noise on the operation characteristics of current differential protection, based on the ρ -plane theory, and proposes a new sector criterion. The sector criterion can flexibly set the minimum phase difference ϕ_{op} and the minimum amplitude ratio R of the current at both ends when the line is fault-free to achieve a dynamic braking area, which effectively improves the anti-interference ability and operation reliability of the system under noise disturbance. Compared with the traditional circular criterion, the proposed sector criterion exhibits superior performance in resisting mal-operation and refusal operation under different signal-to-noise ratio, which can be validated by theoretical analysis and simulation experiments. The sector criterion reduces the mal-operation rate by about 50% compared to traditional criterion, and can ensure that both the mal-operation rate and the refusal operation rate are far less than 10^{-5} , even under complex noise disturbances with a low signal-to-noise ratio (30 dB). It provides a high-reliability solution for current differential protection in the distribution network, which has important theoretical and practical significance for ensuring the safe and stable operation of the new power system.

Keywords: distribution network; current differential protection; ρ -plane; sector criterion; noise disturbance

0 引言

近年来, 随着传统化石能源的枯竭和新能源发电技术

的发展, 越来越多的新能源发电装置接入电网, 配电网由传统的单端电源辐射型网络转向复杂的多端多源网络, 线路潮流也由单向变为双向^[1-2]。传统配网使用的三段式电流

收稿日期: 2024-11-25

* 基金项目: 四川省科技计划(2023NSFSC0480)、工业与信息化部物联网标准与应用重点实验室开放基金(202303)项目资助

保护虽然能够有效判断和隔离单侧电源供电网络中的故障,但在新型配电网中,其保护动作难以满足“四性”要求。基于此,有学者提出运用输电网中技术成熟的电流差动保护来保护有源配电网^[3]。

电流差动保护基于基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, KCL)提出,通过比较被保护线路两端电流来检测故障,因其具有高选择性而被视为最理想的保护方法^[4],已应用于许多重要电力设备的保护中^[5-6]。尽管目前关于配电网已提出了多种基于不同电流幅值、相量或谐波等电气量信息的电流差动保护判据^[7-8],但现有研究往往忽视了信息传输过程中噪声扰动的影响^[9]。鉴于电流差动保护依赖于实时电流信息交换,传输过程中的噪声和干扰可能严重影响保护动作的准确性,因此,考虑噪声鲁棒性对提升保护性能具有重要的工程意义。

目前,输电网中通常使用光纤作为差动保护信息传输的通道,但其铺设成本高,架设困难,目前在配电网难以大范围使用。所以目前配电网仍主要采用电力线载波、4G/5G 公网、EPON 等多种方式混用的通信方式^[10]。尽管现有多种通信通道支持差动保护中的电流信息互传,但信息在传输时不可避免地受到噪声扰动和电磁干扰而发生畸变,从而导致保护误动或拒动。这些噪声扰动通常包括广泛存在的加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)^[11]和由于开关器件工作产生的脉冲噪声^[12]等。因此,在配电网中使用电流差动保护必须考虑信息传输中的复杂噪声扰动问题,并设计出更具鲁棒性的电流差动保护动作策略。

为提高保护在噪声环境下动作的可靠性,可以通过重传、冗余编码等方式从信息传输角度提高数据传输可靠性^[13]。目前已有应用于电力业务的可靠电力通信机制研究,如文献[14]在传统正交多路复用子载波中引入跳频技术,提出一种满足电力业务需求的高可靠低时延通信方式;文献[15]为减少信道噪声影响,提出一种直接序列扩频方案,显著提升了电力通信系统的可靠性。此外,也有研究从提升通信可靠性来提高电流差动保护动作性能,如文献[16]提出一种基于子载波频率跳变的正交频分多址接入的 B5G 系统,用于电流差动保护提高了保护动作可靠性;文献[17]提出一种基于频移键控的正交频分复用信号,并结合跳频技术,显著增强了电力线载波的抗噪声能力,大大提高了电流差动保护动作的可靠性。然而这些研究中,仅从信息可靠性角度入手,且大都使用传统的相量和差制动判据;相关研究表明抵抗噪声扰动、提高电流差动可靠性亦可从新保护动作判据设计来实现。

针对上述问题,提出一种噪声环境下具有高鲁棒性的保护判据—— ρ 平面扇形差动保护判据。 ρ 平面(幅相平面)能直观的反映出线路两端电流的幅相关系。基于 ρ 平面,分别对传统判据(即,相量和差制动判据)动作特性、考虑信道噪声的电流幅相变化以及噪声扰动对保护动作的影

响进行分析,并提出一种能独立限定被保护线路两端电流幅值比和相位差的扇形保护判据,有效提高保护在噪声环境下动作的可靠性。

1 基于 ρ 平面的差动保护动作特性分析

1.1 常规差动保护判据

电流差动保护基于 KCL 比较线路两端电流以检测是否发生故障。如图 1 所示,智能配电终端(smart terminal unit, STU)采集电流信息后通过通信信道传输到对侧并判断线路状态。根据故障特征,目前常用的保护判据有固定门槛判据、相量和差制动判据^[18]、最大值制动判据^[19]、标积制动判据^[20],其表达式分别如式(1)~(4)所示。

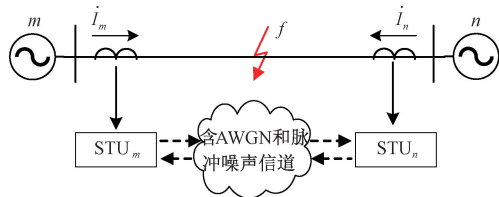


图 1 电流差动保护示意图

Fig. 1 Schematic diagram of current differential protection

$$|I_m + I_n| > I_{op} \quad (1)$$

$$|I_m + I_n| > K_1 |I_m - I_n| \quad (2)$$

$$|I_m + I_n| > K_2 \max\{|I_m|, |I_n|\} \quad (3)$$

$$|I_m + I_n|^2 > -K_3 |I_m| |I_n| \cos\theta \quad (4)$$

式中: I_{op} 为启动门槛, K_1 、 K_2 、 K_3 为结合实际情况整定的不同制动系数, θ 为 I_m 和 I_n 之间的夹角。其中式(4)和(2)可由式(5)相互转换,即判据式(2)和判据式(4)相同,只是以不同形式表示。

$$K_3 = \frac{4K_1^2}{1 - K_1^2} \quad (5)$$

1.2 基于 ρ 平面的动作特性分析

以上常规判据均利用差动电流 $|I_m + I_n|$ 与不同制动电流的比例关系判断线路的运行状况,在差动-制动电流平面能简单清楚地分析动作特性,但线路两侧电流 I_m 、 I_n 需要经过转换,并不能凭借二者的幅相关系直观反映出线路的运行状态。而 ρ 平面法在分析判据动作特性时可以仅利用线路两端电流的相量关系表征动作特性,对于实际工程能更直观的反映故障区和制动区。基于此,以下采用 ρ 平面法进行分析。

在 ρ 平面中,以线路两侧电流中幅值较大的 I_m 作为基准值,对另一侧电流 I_n 进行归一化,即:

$$\dot{\rho} = \frac{I_n}{I_m} = |\dot{\rho}| \angle \theta = x + jy \quad (6)$$

分析可得,不论线路处于何种状态运行,总满足 I_n 和 I_m 的幅值比 $|\dot{\rho}| \leq 1$, 由此线路两侧电流间的幅相关系可以以一个单位圆表示,如图 2 所示。运行点 $\dot{\rho}$ 落在单位圆

不同位置表示线路处于不同的运行状态,保护判据的动作特性可以通过分析 ρ 平面中差动保护边界得到。

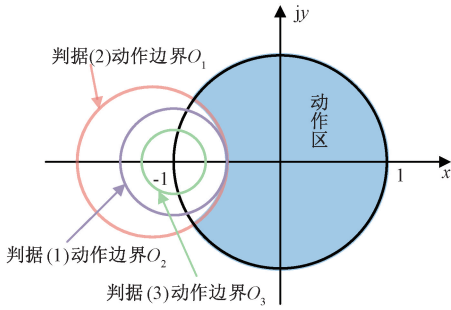


图 2 ρ 平面中各传统判据动作特性

Fig. 2 Characteristics of the action of each traditional criterion in the ρ -plane

以 ρ 平面法分析目前使用较多的相量和差制动判据式(2)的动作特性,将式(6)代入式(2)中,即:

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_m(x + jy)| > K_1 |\dot{I}_m - \dot{I}_m(x + jy)| \quad (7)$$

整理得到:

$$\left(x + \frac{1+K_1^2}{1-K_1^2}\right)^2 + y^2 > \left(\frac{2K_1}{1-K_1^2}\right)^2 \quad (8)$$

式(8)在复平面中是一个以 $\left(-\frac{1+K_1^2}{1-K_1^2}, 0\right)$ 为圆心, $\frac{2K_1}{1-K_1^2}$ 为半径的圆,如图 2 中 $O_1\left(-\frac{1+K_1^2}{1-K_1^2}, 0\right)$ 所示。圆的边界即为该判据的动作边界,其中单位圆与该圆相交的区域表示制动区,保护不动作;单位圆其余部分表示动作区,当运行点落在该区域时,表示被保护区域内发生故障,保护动作。

经过整理,可得固定门槛判据式(1)的动作特性:

$$(x+1)^2 + y^2 > \left(\frac{I_{op}}{I_m}\right)^2 \quad (9)$$

式(9)为复平面中以 $(-1, 0)$ 为圆心, $|I_{op}/I_m|$ 为半径的圆,如图 2 中 $O_2(-1, 0)$ 所示,随着启动门槛 I_{op} 的增大,制动区也逐渐增大。

同理,最大值制动判据式(3)的制动区域在复平面是一个以 $(-1, 0)$ 为圆心, K_2 为半径的圆,如图 2 中 $O_3(-1, 0)$ 所示,其表达式为:

$$(x+1)^2 + y^2 > K_2^2 \quad (10)$$

随着制动系数 K_1, K_2 的增加,判据式(2)和式(3)的制动区域逐渐增大。由此可以根据保护需要,合理增大或减小 K_1, K_2 。

2 信道噪声影响在 ρ 平面的可视化分析

在电流差动保护的应用过程中,数据采集和信息传输等关键环节易受噪声扰动,导致电流幅值和相位畸变,影响保护性能。配电网中的复杂噪声主要包括加性高斯白噪声和脉冲噪声^[21]。

$$n_{noise} = n_w + n_z \quad (11)$$

式中: n_w 表示加性高斯白噪声, n_z 表示脉冲信号。通常使用 Bernoulli-Gauss 模型对上述复杂噪声进行建模,其概率密度函数表示为:

$$p_{n_{noise}} = (1-p)CN(0, \sigma_w^2) + pCN(0, \sigma_w^2 + \sigma_z^2) \quad (12)$$

式中: $CN(0, \sigma_w^2)$ 和 $CN(0, \sigma_w^2 + \sigma_z^2)$ 分别表示均值为 0, 方差为 σ_w^2 和 $\sigma_w^2 + \sigma_z^2$ 的高斯分布的复随机变量, $p \in (0, 1)$ 为脉冲噪声平均到达率^[22]。以上两种加性噪声的存在使得配电网中的电流差动保护策略必须考虑信息传输中的噪声附加量带来的扰动。

首先考虑电流相位受到噪声扰动的情况。对于如图 1 所示的两端系统而言,假设 $\dot{I}_m = I_m \angle \varphi_m$, $\dot{I}_n = I_n \angle \varphi_n$, 系统正常运行且忽略噪声扰动时, $\dot{\rho} = \dot{I}_n / \dot{I}_m = 1 \angle 180^\circ$; 当电流相位受到噪声扰动发生偏移时, $\dot{I}_m = I_m \angle \varphi_m + \varphi_{noise, m}$, $\dot{I}_n = I_n \angle \varphi_n + \varphi_{noise, n}$, 其中 $\varphi_{noise, m}$ 、 $\varphi_{noise, n}$ 为噪声扰动带来的相位附加量,包括高斯白噪声附加量和脉冲噪声附加量。此时两端电流比为:

$$\dot{\rho} = \frac{\dot{I}_n}{\dot{I}_m} = 1 \angle \varphi_{mn} + \varphi_{noise} \quad (13)$$

式中: $\varphi_{mn} = \varphi_n - \varphi_m = 180^\circ$, φ_{noise} 表示 m, n 两端受噪声影响产生的电流相位偏移量之差,即 $\varphi_{noise} = \varphi_{noise, n} - \varphi_{noise, m}$ 。随着 φ_{noise} 的变化,系统运行点在 ρ 平面的轨迹如图 3 所示。

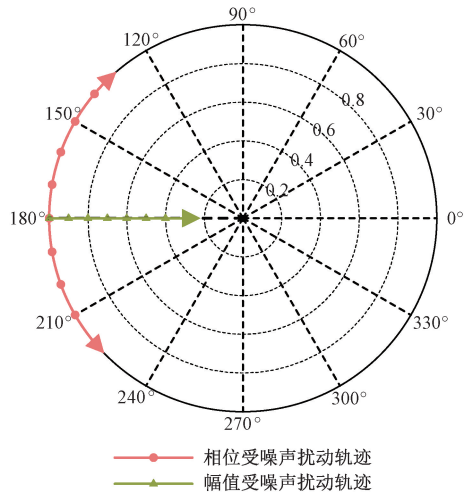


图 3 考虑噪声扰动的运行点轨迹

Fig. 3 Trajectory plot of the operating point considering noise

其次,考虑电流幅度受到噪声扰动情况。假设由高斯白噪声和脉冲噪声共同扰动引起的两端电流幅值误差分别为: $I_{noise, m}$ 、 $I_{noise, n}$ 。令 $I_{noise} = I_{noise, m} - I_{noise, n}$, $I_{mn} = I_m - I_n$, 即 $\dot{I}_m' = (I_m + I_{mn}) \angle \varphi_m$, $\dot{I}_n' = (I_n + I_{n1}) \angle \varphi_n$, 此时:

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= \frac{\dot{I}_n'}{\dot{I}_m'} = \frac{I_n + I_{noise, n}}{I_m + I_{noise, m}} \angle 180^\circ = \\ &\left(1 - \frac{I_{mn}}{I_m'} - \frac{I_{noise}}{I_m'}\right) \angle 180^\circ \end{aligned} \quad (14)$$

保护区内无故障时 $I_{mn} = 0$, 随着 I_{noise} 的变化, 系统运行点在 ρ 平面的轨迹如图 3 所示。

噪声引起的误差量 φ_{noise} 、 I_{noise} 大小与噪声强度有关, 噪声强度越大, 产生的误差也越大。噪声强度通常使用信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)来衡量:

$$SNR_{dB} = 10 \lg \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (15)$$

式中: P_{signal} 表示输入信号功率(即电流采样信号), P_{noise} 表示噪声功率, 当信道中只存在高斯白噪声时 $P_{noise} = \sigma_w^2$, 当信道中同时存在高斯白噪声和脉冲噪声 $P_{noise} = \sigma_w^2 + \sigma_z^2$ 。若同时考虑电流的幅值和相位误差, 那么线路无故障时运行点应在如图 4 所示的区域中, 并且随着 SNR 减小, 该区域逐渐增大。显然, 当 SNR 过小, 即 φ_{noise} 、 I_{noise} 较大时, 运行点会超出制动区域, 导致保护误动。同理, 若保护区内发生故障, 电流采样信息经过含噪声信道传输后, $\dot{\rho}$ 可能从动作区偏移至制动区, 即保护发生拒动。

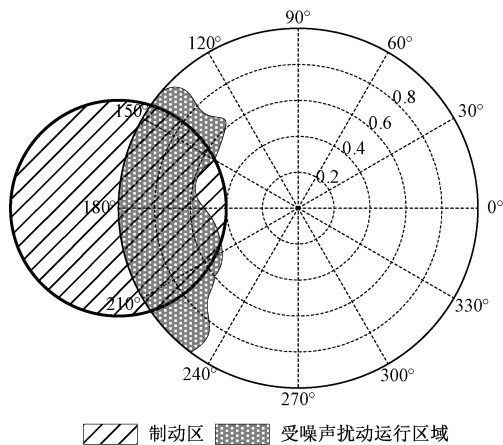


图 4 噪声扰动下系统运行区域

Fig. 4 The operating area of the system considering noise

3 噪声扰动下扇形电流差动保护判据

线路保护区内不论是否发生故障, $\dot{\rho}$ 总会运行在单位圆中, 因此可以通过对单位圆进行划分以区分是否发生区内故障, 不同判据通过指定不同的制动边界以划分制动区域与动作区域。在划分制动区域时, 考虑到线路正常运行时 $\dot{\rho}$ 在 $1 \angle 180^\circ$ 附近; 而电流采样、数据同步等会产生一定误差, 同时信息传输时也有噪声扰动, 因此设定制动区域时需保留一定的裕度以防止保护误动, 如图 2 所示判据。

传统圆形判据通过调整制动系数 K 改变制动区域大小, 对于制动区域在 ρ 平面中具体分布不能精确控制。基于此, 考虑在 ρ 平面中建立一种制动区域更灵活、抗扰动能力更好的保护判据, 即单独限定线路两端电流的幅值比和相位差, 保护判据表达式为:

$$(|\dot{\rho}| < R) \cup (|\arg(\dot{\rho})| < \phi_{op}) \quad (16)$$

式中: R 为两端电流幅值比约束值, ϕ_{op} 为电流相角差约束

值。所提判据的制动特性如图 5 所示, 其制动区域形似扇形, 当线路两端电流的最小幅值比 R 和最小相角差 ϕ_{op} 相同时, 所提扇形判据相比圆形判据的制动区更大, 具有更好的抗噪声效果。

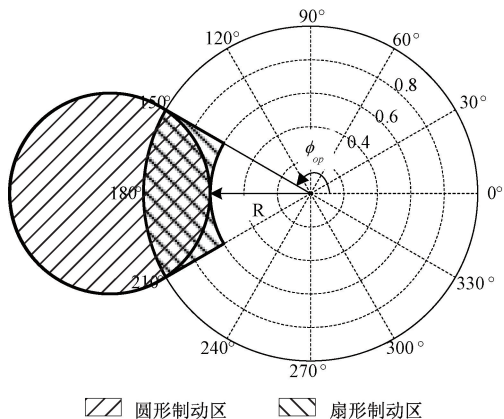


图 5 扇形判据的动作特性

Fig. 5 Operational characteristics of the sector criterion

考虑到噪声环境下电流幅值和相位受到噪声扰动, 相比无噪声环境, 此时保护判据中电流信息含有信道噪声附加量 φ_{noise} 、 I_{noise} , 表达式为:

$$\left(\left| 1 - \left(\frac{I_{mn}}{I_m} + \frac{I_{noise}}{I_m} \right) \right| < R \right) \cup (|\varphi_{mn} + \varphi_{noise}| < \phi_{op}) \quad (17)$$

由于噪声扰动量 φ_{noise} 、 I_{noise} 的存在, 可能会导致线路保护区内无故障时运行点超出制动区, 从而发生保护误动作, 或者区内有故障但运行点 $\dot{\rho}$ 由动作区偏移至制动区, 引起保护拒动作。根据线路实际运行情况和 φ_{noise} 、 I_{noise} 大小, 适当增大或减小 ϕ_{op} 或 R 来改变保护的動作边界, 适配不同的噪声环境, 从而使得新的差动保护策略对噪声扰动更具鲁棒性。

4 仿真分析

为对 ρ 平面扇形判据的抗噪声能力进行评估, 利用 Matlab/Simulink 搭建如图 1 所示的 110 kV (50 Hz) 系统模型, 仿真电源电势角差为 15° , 线路 f 点发生三相接地故障, 脉冲噪声平均到达率 $p = 0.5$, 研究保护在不同噪声扰动下的性能表现。一般情况下, 配电网信噪比约为 60 dB 可视为完美(无噪声扰动)信道情况^[23]。因此, 为了模拟配电网中较强的噪声扰动情况, 选取 $SNR \leq 30$ dB 范围进行以下仿真实验。

4.1 噪声扰动下扇形判据误动性能验证

1) 高斯背景噪声扰动下误动性能

在研究抗误动场景中, 线路正常运行, 即 f 点不发生故障, 此时差动保护装置在接收到含 AWGN 扰动的电流后可能发生误动作。在保证最小相角差 ϕ_{op} 和最小幅值比 R 相同的条件下, 对比所提扇形判据与文献[17]中所述相

量和差制动判据的误动率(以下简称“制动判据”)。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 判据参数设置

Table 1 Parameter configuration of criterion

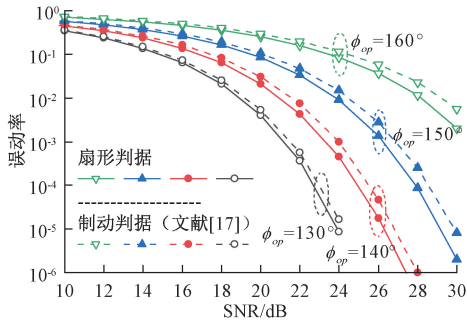
扇形判据参数		文献[17]中制动判据参数
$\phi_{op}/(^{\circ})$	R	K_1
160	0.70	0.17
150	0.57	0.26
140	0.46	0.36
130	0.36	0.46

不同 SNR 下扇形判据与文献[17]中制动判据的误动率对比如图 6 所示,其中图 6(a)、(b)分别为仅电流相位、幅值受到噪声扰动的误动率对比,图 6(c)为电流幅值和相位都受到噪声扰动的误动率对比。由图 6 可以看出,两种判据的误动率随着 SNR 的增大而降低,其中,在相同 SNR 下,扇形判据的误动率总低于制动判据,验证了所提判据抗误动性能更好。此外,在相同 SNR 下,随着最小相角差 ϕ_{op} 和最小幅值比 R 减小,即制动区域逐渐增大,误动率也逐渐降低,由此可以通过调整 ϕ_{op} 、 R 、 K 等参数增大制动面积以提高保护的抗误动能力。

2) 复杂噪声扰动下误动性能

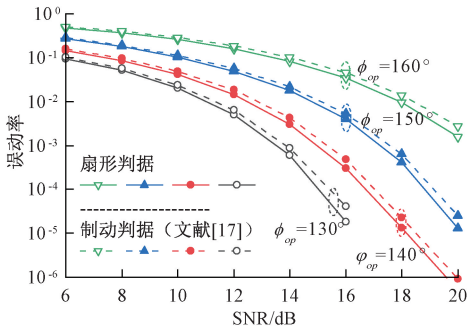
本节验证所提扇形判据在高斯白噪声与脉冲噪声同时存在的复杂噪声环境下保护的抗误动效果。仿真参数设置如表 1 所示。

图 7 所示为复杂噪声环境下电流幅值和相位均受到扰



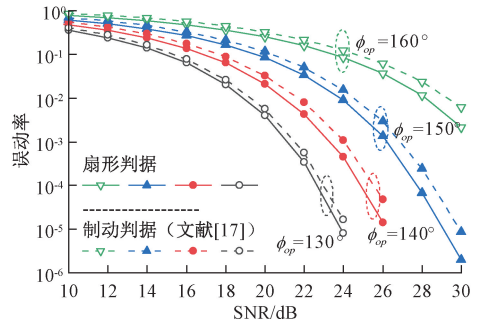
(a) 仅电流相位受到噪声扰动的误动率

(a) Mal-operation rate when the current phase is disturbed by noise



(b) 仅电流幅值受到噪声扰动的误动率

(b) Mal-operation rate when the current amplitude is disturbed by noise



(c) 电流幅值和相位均受到噪声扰动的误动率

(c) Mal-operation rate when the current amplitude and phase are disturbed by noise

图 6 正常运行时两种判据误动率对比

Fig. 6 Comparison of the mal-operation rate of the two criterions

动时两种判据的误动率对比;图 8 所示为不同噪声扰动下保护的误动率对比。由图 7 可以看出,在复杂噪声环境下保护误动率随 SNR 的变化趋势与仅受 AWGN 扰动时的结论相同,即随着 SNR 的增大,保护误动率逐渐降低。此外,由图 8 可以看出,在复杂噪声环境下保护的误动率要高于仅受 AWGN 扰动下的误动率。这一差异主要是由于脉冲噪声的瞬时冲击对电流信号造成了显著影响,增加了保护装置在噪声扰动下发生误动作的风险。因此可以通过适当增加制动区,即减小 ϕ_{op} 、 R 以提高保护的抗误动性能。

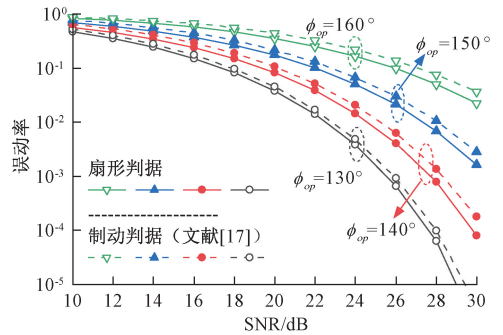


图 7 复杂噪声环境下保护误动率对比

Fig. 7 Comparison of the mal-operation rate in complex noise environments

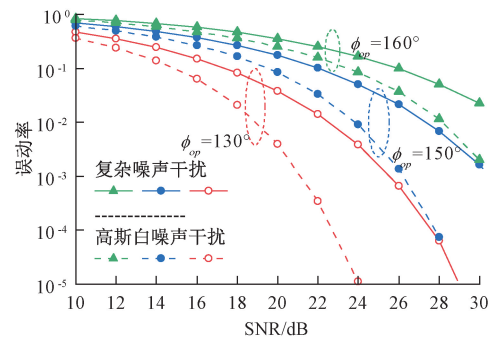


图 8 不同噪声扰动下保护误动率对比

Fig. 8 Comparison of the mal-operation rate under different noise interferences

4.2 噪声扰动下扇形判据拒动性能验证

1) 高斯背景噪声扰动下拒动性能

线路保护区内发生故障时,差动保护装置接收到含噪声的电流采样后可能导致 $\dot{\rho}$ 偏移至制动区,即保护发生拒动。在 f 处设置三相接地故障,假设电流幅值、相位均受到 AWGN 扰动,设置不同 SNR 对比分析不同制动区的拒动率。扇形制动区参数 ϕ_{op} 、 R 设置如表 1 所示。

不同 SNR 下扇形判据拒动率如表 2 所示。由表 2 可以看出,在相同制动区下,随着 SNR 增大,保护拒动率逐渐降低,并最终降至约为 0 的极小值。对于实际线路运行约 60 dB 的噪声环境^[23],扇形判据可以保证几乎不会发生拒动。此外还发现,随着制动区逐渐增大,保护拒动率将会增加,因此为保证保护具有较低的拒动率,需要设置尽可能小的制动区。

表 2 不同 SNR 下扇形判据拒动率

Table 2 Refusal operation rate of the sector criterion under different SNR

SNR/ dB	$\phi_{op}/(^{\circ})$			
	160	150	140	130
2	5.82×10^{-3}	1.44×10^{-2}	3.01×10^{-2}	5.50×10^{-2}
6	2.96×10^{-4}	9.88×10^{-4}	3.09×10^{-3}	6.91×10^{-3}
10	≈ 0	≈ 0	1.20×10^{-5}	4.70×10^{-5}
12	≈ 0	≈ 0	≈ 0	2.00×10^{-6}

2) 复杂噪声扰动下拒动性能

复杂噪声环境下所提扇形判据在不同 SNR 的拒动率如表 3 所示。与仅受高斯背景噪声扰动相同,随着 SNR 逐渐增大,各参数下的保护拒动率均呈现下降趋势;同时在 SNR 保持不变时,随着保护制动区增大,即 ϕ_{op} 或 R 减小,拒动率逐渐升高。与表 2 对比发现,SNR 相同时,复杂噪声会产生更严重的扰动,即保护拒动率普遍高于仅受 AWGN 扰动的情形。为减小保护在复杂噪声环境下的拒动率,可以通过调整 ϕ_{op} 或 R ,以在一定程度上适应不同的噪声环境,减少拒动的发生。

表 3 复杂噪声下扇形判据拒动率

Table 3 Refusal operation rate of the sector criterion under complex noise

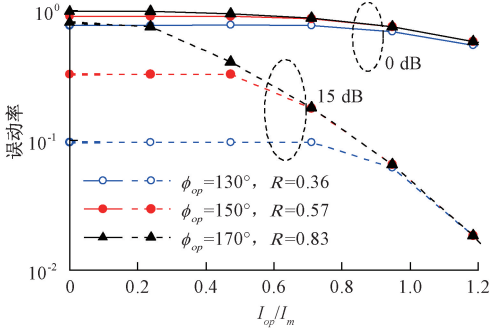
SNR/ dB	$\phi_{op}/(^{\circ})$			
	160	150	140	130
2	1.16×10^{-2}	3.04×10^{-2}	5.66×10^{-2}	9.60×10^{-2}
6	3.87×10^{-3}	1.10×10^{-2}	2.13×10^{-2}	3.67×10^{-2}
10	3.86×10^{-4}	1.40×10^{-3}	2.99×10^{-3}	5.64×10^{-3}
12	6.20×10^{-5}	2.34×10^{-4}	6.19×10^{-4}	1.33×10^{-3}
14	3.00×10^{-6}	1.50×10^{-5}	6.50×10^{-5}	1.89×10^{-4}

为保证保护同时具有良好的抗误动、抗拒动性能,需设置合适的制动区域,即制动区不能过大或过小。扇形判据

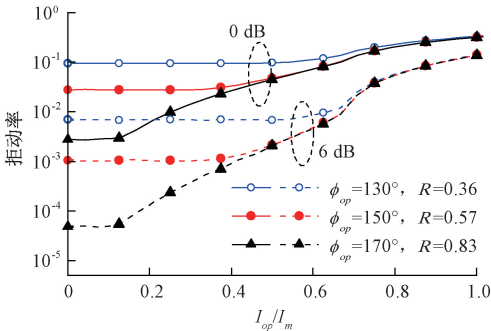
可以通过 ϕ_{op} 、 R 对两端电流相角差和幅值比分别进行限定,相比只能使用制动系数 K 调整制动区域的传统判据,扇形判据能更灵活的划分制动区域,使得噪声环境下保护的鲁棒性更优越。

4.3 启动阈值 I_{op} 与噪声扰动关系

扇形判据或其他判据通常都需要与判据式(1)联合使用,只有两个判据同时满足保护才会动作,因此保护的性能也与阈值 I_{op} 的设定有关。作为电流差动保护中的关键参数, I_{op} 的设定决定了保护的响应阈值,直接影响着保护的动作效果。图 9 给出了高斯背景噪声扰动下 I_{op} 取值与保护误动率、拒动率之间的关系,图 10 和 11 分别为不同噪声扰动下保护的误动率和拒动率随 I_{op} 变化对比情况。



(a) 保护误动率随 I_{op} 变化情况
(a) The change of the mal-operation with I_{op}



(b) 保护拒动率随 I_{op} 变化情况
(b) The change of the refusal operation with I_{op}

图 9 保护误动率、拒动率随 I_{op} 变化情况

Fig. 9 The change of the mal-operation and the refusal operation with I_{op}

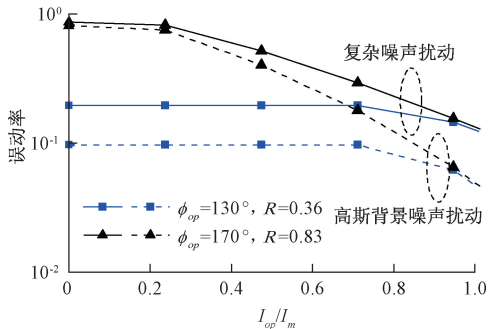


图 10 不同噪声扰动下误动率随 I_{op} 变化情况 (SNR=15 dB)

Fig. 10 Comparison of the mal-operation rate with I_{op} under different noise disturbances (SNR=15 dB)

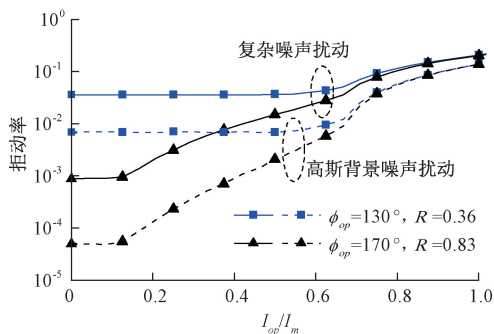


图 11 不同噪声扰动下拒动率随 I_{op} 变化情况(SNR=6 dB)

Fig. 11 Comparison of the refusal operation rate with I_{op} under different noise disturbances(SNR=6 dB)

由图 9~11 可以看出,当制动区域扩张时,即减小扇形判据中的参数 ϕ_{op} 或 R ,或增大阈值 I_{op}/I_m ,都能有效地减少保护装置的误动率,但与此同时,拒动率呈现出上升趋势。同时,在 I_{op}/I_m 较小时,保护受复杂噪声扰动的误动率或拒动率均高于只受高斯背景噪声扰动的情形。此外,在 I_{op}/I_m 较小的条件下,辅助判据的制动区域小于扇形判据的制动区域,此时,保护装置的误动率和拒动率并不会随着 I_{op}/I_m 的增加而发生显著变化。当 I_{op}/I_m 增加到一定程度,使得辅助判据制动区域超过扇形判据的制动区域时,总制动区域将主要随着 I_{op} 的提高而增大。在这一情况下,保护装置的误动率和拒动率将主要受辅助判据阈值的影响。由此,设计电流差动保护方案时,合理的选择和调整保护判据参数可以确保在降低误动率的同时,也能有效控制拒动率的增长。

5 结 论

新型配电系统中,线路潮流和故障电流均可能出现双向流动,相比传统三段式电流保护,电流差动保护因其卓越的选择性具有更好的保护效果,目前已被广泛研究与应用。然而,电流采样信息对传过程中的噪声扰动一直是困扰其可靠性的关键因素。通过深入分析噪声对电流差动保护动作特性的影响,提出了一种基于 ρ 平面的抗噪声扰动扇形判据,旨在提高保护动作的准确性和可靠性。与传统圆形判据相比,扇形判据通过独立控制电流幅值比和相位差,能够提供更精确灵活的制动区域,并且在相同最小幅值比 R 和最小相角差 ϕ_{op} 下,扇形判据具有更大的制动区域,从而在噪声扰动下展现出更优的抗扰动性能。仿真实验结果表明,在复杂噪声环境下,即使信噪比较低(30 dB),所提出的扇形判据仍能保证误动率和拒动率远小于 10^{-5} ,相比传统制动判据误动率可降低约 50%,证明了其在实际电力系统应用中的巨大潜力。

此外,研究启动门槛 I_{op} 与噪声扰动的关系发现,与扇形判据 ϕ_{op} 、 R 相同,随着 I_{op}/I_m 变化,保护误动率和拒动率呈现相反的变化趋势,由此,可以通过调整 ϕ_{op} 、 R 、 I_{op} 以

实现对制动区域的精确控制,有助于在确保保护动作准确性的同时,提高其对噪声扰动的鲁棒性。

参考文献

- [1] GAO H L, LI J, XU B Y. Principle and implementation of current differential protection in distribution networks with high penetration of DGs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 565-574.
- [2] 刘会家,冯铃,艾璨. 基于 GA-ADAM 优化的 BPNN 配电网潮流计算[J]. 电子测量技术, 2023, 46(24): 84-92.
LIU H J, FENG L, AI C. Distribution network power flow calculation based on the BPNN optimized by GA-ADAM[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24): 84-92.
- [3] 韩笑,孙杰,蒋剑涛,等. 考虑不可测负荷分支接入的配电网自适应差动保护[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 12-17.
HAN X, SUN J, JIANG J T, et al. Adaptive differential protection for distribution network considering unmeasurable load branch[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 12-17.
- [4] 李振宇,王国玲,杨宇生,等. 一种海上平台直流微网系统复合型短路故障检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2023(1): 157-164.
LI ZH Y, WANG G L, YANG Y SH, et al. A combined short-circuit fault detection method for DC microgrid system in an offshore platform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023(1): 157-164.
- [5] 杨秀川,夏经德,邵文权,等. 克服汲出电流影响的故障分量虚拟电压相位差母线保护方法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(7): 29-38.
YANG X CH, XIA J D, SHAO W Q, et al. Fault component virtual voltage phase difference bus protection method overcoming the influence of drain current [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(7): 29-38.
- [6] 蒋嘉彬,张晨浩,宋国兵,等. 电流差动保护在海上风电低频送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 131-139.
JIANG J H, ZHANG CH H, SONG G B, et al. Adaptability analysis of current differential protection in low-frequency transmission lines of offshore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 131-139.

- [7] 苏斌, 侯思祖, 郭威. 基于图像融合和双通道卷积神经网络的配电网故障选线方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 54-66.
SU B, HOU S Z, GUO W. Research on distribution network fault line selection method based on image fusion and dual-channel convolutional neural network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 54-66.
- [8] 梁营玉, 卢正杰. 基于补偿系数的有源配电网自适应电流差动保护[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2268-2275.
LIANG Y Y, LU ZH J. Adaptive differential protection principle based on compensation coefficient for active distribution network [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2268-2275.
- [9] 杜政奇, 王敬华, 张新慧. 基于参数优化 VMD 和能量相似度的配电网故障区段定位方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 95-101.
DU ZH Q, WANG J H, ZHANG X H. Fault section location in distribution network based on parameter optimization VMD and energy similarity[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 95-101.
- [10] 刘文霞, 宫琦, 郭经, 等. 基于混合通信网的主动配电信息物理系统可靠性评价[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1706-1718, 1907.
LIU W X, GONG Q, GUO J, et al. Reliability simulation of ADN cyber-physical system based on hybrid communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1706-1718, 1907.
- [11] 彭丽, 赵伟, 陈垒, 等. 电网信号谐波分析算法计算性能比较研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(1): 1-20.
PENG L, ZHAO W, CHEN L, et al. Research on the performance comparison of harmonic analysis algorithms for power grid signals [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(1): 1-20.
- [12] 汪芙平, 刘书翔, 黄松岭, 等. 脉冲噪声干扰下同步相量测量 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1673-1683.
WANG F P, LIU SH X, HUANG S L, et al. Synchrophasor measurement under bursty impulsive noise[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1673-1683.
- [13] 杨大伟, 马军, 李凯, 等. 基于时间复杂度的无线网络编码数据包传输次数优化分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(1): 32-35.
YANG D W, MA J, LI K, et al. Optimization analysis of wireless network coding packet transmission times based on time complexity [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(1): 32-35.
- [14] 曾琦, 刘友波, 李梓玮, 等. 支持新型电力系统的 5G/6G 高可靠低时延电力物联网通信设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21), 8435-8444.
ZENG Q, LIU Y B, LI Z W, et al. Design and analysis of 5G/6G power internet-of-thing communications with high-reliability and low-latency for supporting new type power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21), 8435-8444.
- [15] 曹旺斌, 康辉, 谢志远, 等. MIMO-PLC 直接序列扩频系统编码方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 121-129.
CAO W B, KANG H, XIE ZH Y, et al. Research on coding method of MIMO-PLC direct sequence spread spectrum system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 121-129.
- [16] PENG X, ZENG Q, LIU Y B, et al. Power internet-of-thing B5G networks for differential protection in new-type power systems [C]. 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2), 2023: 3848-3853.
- [17] ZHANG J, LONG CH, ZHANG H, et al. Design and analysis of reliable current differential protection through improved power-line communication[J]. IEEE Access, 2024, 12: 77421-77428.
- [18] ZHOU CH H, ZOU G B, ZANG L D, et al. Current differential protection for active distribution networks based on improved fault data self-synchronization method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 166-178.
- [19] 顾乔根, 张晓宇, 吕航, 等. 柔性低频输电系统的主变稳态负序差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 168-177.
GU Q G, ZHANG X Y, LYU H, et al. Steady state negative sequence differential protection of a transformer in a flexible low-frequency transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 168-177.
- [20] 李旭. 风电场弱馈源对送出线路继电保护的影响及关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
LI X. Study on impact of weak-infeed wind farm on transmission line relay protection and key technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.

- [21] 宁更新, 肖若君, 谢靓. 基于多分量 LFM 信号时频分析的水声多普勒和时延估计研究[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(2): 688-696.
- NING G X, XIAO R J, XIE L. Estimation of underwater acoustic Doppler factor and time delay based on time-frequency analysis of multi-component LFM signals [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2024, 46(2): 688-696.
- [22] 李飞. 电力线通信系统中脉冲噪声消除算法研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2018.
- LI F. Research on impulse noise mitigation in power line communication systems [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [23] ZHAN L W, LIU Y, CULLISS J, et al. Dynamic single-phase synchronized phase and frequency

estimation at the distribution level [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 2013-2022.

作者简介

曾琦, 副教授, 主要研究方向为电力物联网、电网数字化、电力通信与信号处理。

E-mail: qzengl@hotmail.com

张皓, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制、电网数字化。

E-mail: hooohao@foxmail.com

何川(通信作者), 副教授, 主要研究方向为电力系统设计规划与优化运行、新能源并网以及储能技术等。

E-mail: he_chuan@scu.edu.cn

黄孝兵, 博士研究生, 主要研究方向为电力数字化设备、电力物联网、模拟集成电路、功率器件集成。

E-mail: xiaobinghuang@my.swjtu.edu.cn