

环状有源配电网改进电流差动保护方案

刘科研¹, 叶学顺¹, 李 昭¹, 魏 来², 李 波²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:为提高配电网供电可靠性和分布式电源接纳能力,有源环状网络成为配电网主要发展方向之一。然而,大量分布式电源接入改变了配电网潮流和故障特征,传统三段式电流保护方案可靠性不足。为此,提出一种针对环状有源配电网的改进电流差动保护方案。首先对环状有源配电网区内、外故障电流关系表达式进行推导,分析两端电流故障分量的向量关系;然后利用保护区段两端故障电流比构造主保护判据,进一步地针对环状结构配电网设置避免保护误动的辅助判据;最后利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建环状有源配电网模型,通过大量仿真分析,验证所提保护方案的有效性和抗干扰能力。该方案同样适用于典型辐射状有源配电网。

关 键 词:电流差动保护;环状有源配电网;电流故障分量;分布式电源

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.017 中图分类号: TM77 文章编号: 1673-9140(2023)03-0157-09

An improved current differential protection scheme for annular active distribution networks

LIU Keyan¹, YE Xueshun¹, LI Zhao¹, WEI Lai², LI Bo²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to improve the power supply reliability and the source acceptance capacity of distribution networks, the active ring network has become one main development trend of the distribution network. However, the connection of numerous distributed power sources will impact the power flow and fault characteristics, and thus reduce the performance of the traditional three-stage current protection scheme. In this regard, an improved current differential protection scheme is proposed for annular active distribution networks in this paper. Firstly, the expressions for the relationship between the fault currents inside and outside the annular active distribution network are derived, and thus the vectorial relationship between the fault current components at both ends can be figured out. Then the main protection criterion is constructed by the fault current ratio of the two ends of protected area section., and the auxiliary protection criterion to avoid protection misoperation is also set for the annular structure distribution network. Finally, the PSCAD/EMTDC simulation platform is used to verify the effectiveness and interference resistance of the proposed protection scheme.

Key words: current differential protection; the annular active distribution network; current fault component; distributed power source

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-08-11

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5400-202099524A-0-0-00)

通信作者: 刘科研(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事配电网建模仿真与智能分析的研究; E-mail: liukeyan@epri.sgcc.com.cn

随着“双碳”目标和智能电网建设的不断推进,大量分布式电源的接入使配电网发展成潮流双向流动的有源网络^[1-3],且逆变类分布式电源(inverter-interfaced distributed generation, IIDG)的故障电流响应与常规电源存在较大差异^[4]。以上因素导致传统三段式电流保护可靠性不足^[5-6],有源配电网继电保护问题亟待解决。

国内外学者在有源配电网保护方面开展了大量研究,例如:为降低配电网改造成本,需要对分布式电源接入采取限制措施,但违背了新能源高渗透率的发展愿景^[7]。较为常用的过电流保护在应用时判据整定难度较大,且在原理上缺乏方向性^[8-9],而差动保护利用区段两端电气量构造保护判据,具有绝对选择性和高灵敏性,保护判据整定具有较好的适应性^[10]。因此,差动保护更适合解决有源配电网保护难题。

差动保护方案的性能特点与判据类型选择有关。在分布式电源并网环节中,电力电子器件故障后突变的电压、电流中包含高频分量,文献[11]构造高频阻抗作为差动保护判据,能够适用于分布式电源T接情况;文献[12]针对分布式电源的低电压穿越特性,提出基于母线电压和馈线电流相比较的差动保护方案。然而,目前配电网中电压互感器配置率较低,以上方法难以得到有效应用。当有源配电网发生故障后,差动电流同样包含丰富的幅值和相位故障特征。在差动电流幅值方面,文献[13]利用分相全电流和正序电流,构造了综合电流幅值比判据,此方法对采样同步要求低;文献[14]构造了更为全面的“充分式”差动电流保护,包括负序电流、电流幅值变化量等,能够自动优选灵敏度最高的子判据,但基于差动电流幅值的保护方案存在保护死区,需要设置必要的后备保护;在差动电流相位方面,文献[15]构造了基于故障电流正序分量和参考相量的方向判据,并引入泛化角提高判据的鲁棒性,但对数据同步要求较高;针对数据通信和同步问题,文献[16]提出了基于光学电流互感器的相差保护方案,保护性能不受温度等因素影响,但该类互感器设备成本较高,难以实现配电网的大规模应用。

环状有源配电网因其较高的供电可靠性及分布式电源接纳能力,正成为配电网的一种主要发展

方向^[17]。然而,以上差动保护方案大多针对辐射状配网,考虑环状结构潮流和故障特征差异的适应性研究较少。

基于此,本文提出一种适用于环状有源配电网的电流差动保护方案。首先,分别对不同位置的区内、外故障特性进行分析;其次,利用保护区段两端电流故障分量比的向量关系构造主保护判据,针对存在保护误动的特殊情况设置对应辅助判据;最后,基于PSCAD/EMTDC仿真平台搭建环状有源配电网模型,通过大量仿真分析,验证所提电流差动保护方案的有效性。所提方案不仅具有不受故障类型、负荷容量差异以及故障点位置影响的特点,还能够有效耐受过渡电阻及噪声干扰,并同样适用于常规的辐射状配网结构。

1 环状配电网故障电流特性分析

环状有源配电网供电灵活性较高,但也意味着其电流变化情况更加复杂。为了更具体地剖析不同情况下环状有源配电网故障特性,在含IIDG的环状配电网下,本文推导保护区段两端电流故障分量关系表达式,从幅值和相位角度对区内、外故障特性进行分析。通过对母线和馈线发生故障的情况进行分析,研究故障位置、故障程度以及负荷容量分布对电流故障特性的影响。最后,通过故障前、后保护区段故障电流变化特征差异,为后续保护方案设计提供可靠的理论依据。

环状有源配电网如图1所示,其中M、N、K、Z、Y、X分别表示设置的保护点,故障点 f_1 在馈线2上,故障点 f_2 在MN所属母线上。

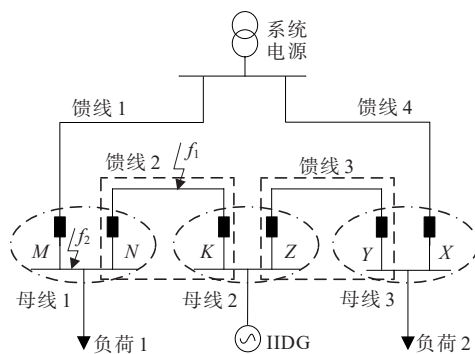


图1 环状有源配电网

Figure 1 An annular active distribution network

1.1 区内故障

当 f_1 点发生故障时,NK区段的故障分量附加序网如图2所示。根据叠加原理推导NK区段两端电流故障分量比为

$$\dot{i}_{PCR,NK} = \frac{\dot{U}_f Z_{Kf} (Z_{Kf} + Z_2) + \dot{I}_{\parallel DG} \cdot Z_{Kf} Z_f (Z_f + Z_1)}{\dot{U}_f Z_1 (Z_{Kf} + Z_2) + \dot{I}_{\parallel DG} \cdot Z_2 Z_f (Z_f + Z_1)} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z_1 = [((Z_{L2} + Z_{XS}) \parallel Z_s) + Z_{MS}] \parallel Z_{L1} + Z_{Nf} \\ Z_2 = [(Z_{Nf} \parallel Z_{L1} + Z_{MS}) \parallel Z_s + Z_{XS}] \parallel Z_{L2} + Z_{YZ} \\ Z_f' = Z_1 \parallel Z_{Nf} + Z_f \end{cases} \quad (2)$$

式中, Z_s 、 Z_{L1} 和 Z_{L2} 分别为系统电源、负荷1、2对应的等效阻抗; Z_{XS} 、 Z_{MS} 分别为馈线4、1对应的等效阻抗; Z_{XS} 为保护点X、S之间的等效阻抗; Z_{YZ} 为保护点Y、Z之间的等效阻抗; Z_{Nf} 为保护点N到故障点的等效阻抗; Z_{Kf} 为保护点K到故障点的等效阻抗。

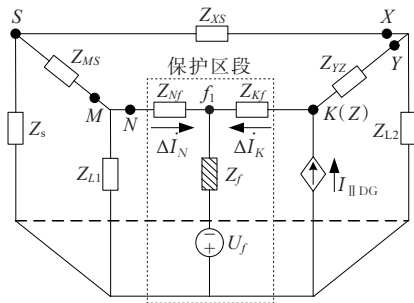


图2 环状配电网区内故障附加序网

Figure 2 Fault additional sequence network of annular distribution network with an internal fault

10 kV 中压配电网线路长度一般小于 10 km,线路对应的阻抗约为 $3.8 \Omega/\text{km}^{[18]}$,因此,常规中压配电网中负荷阻抗远大于线路阻抗^[19]。通过化简计算可以得到 $\dot{i}_{PCR,NK}$ 向量特征为

$$\begin{cases} |\dot{i}_{PCR,NK}| < 0.5 \\ \arg(\dot{i}_{PCR,NK}) \approx 0^\circ \end{cases} \quad (3)$$

同理,当 f_2 点发生故障时,以MN为对象,其两端和电流故障分量比 $\dot{i}_{PCR,MN}$ 特征与式(3)相同。因此,当环状配电网中发生区内故障时,区段两端电流故障分量幅值比小于0.5,相位差较小。

1.2 区外故障

由于非故障区段相对系统电源和IIDG的位置不同,且故障电流特性与故障前电流状态、故障程度等有较大关系,因此需进行具体分析。

从图1可知,保护区段分为馈线区段(方框)和母线区段(椭圆框)2种。由于馈线区段内无其他节点馈出或馈入电流,因此,非故障区段中的馈线区段两端故障电流几乎一致。以 f_2 点发生故障为例,对于图1中的NK和YZ区段,其两端电流故障分量的向量关系为幅值比接近1、相位差接近 180° 。对于母线区段,以XY区段为对象进行分析,故障分量附加序网如图3所示。

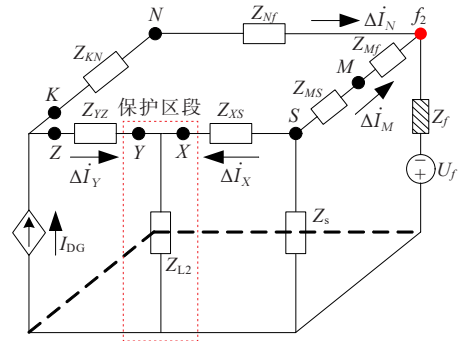


图3 环状配电网区外故障附加序网

Figure 3 Fault additional sequence network of annular distribution network with an external fault

根据叠加原理推导XY区段两端电流故障分量比为

$$\begin{cases} \dot{i}_{PCR,XY} = \frac{\dot{I}_{U_f} \cdot Z_{L2} / (Z_{YZ} + Z_{L2}) + \dot{I}_{DG}}{\dot{I}_{U_f} + \dot{I}_{DG} \cdot Z_{L2} / (Z_6 + Z_{L2})} \\ \dot{I}_{U_f} = \frac{\dot{U}_f Z_5 Z_s}{(Z_4 \parallel Z_5 + Z_f)(Z_4 + Z_5)(Z_3 + Z_s)} \\ \dot{I}_{DG} = \dot{I}_{\parallel DG} Z_5 / (Z_5 + Z_7) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z_3 = Z_{YZ} \parallel Z_{L2} + Z_{XS} \\ Z_4 = Z_3 \parallel Z_s + Z_{MS} + Z_{Nf} \\ Z_5 = Z_{KN} + Z_{Nf} \\ Z_6 = (Z_{Mf} + Z_{MS}) \parallel Z_s + Z_{XS} \\ Z_7 = Z_6 \parallel Z_{L2} + Z_{YZ} \end{cases} \quad (5)$$

结合图3与式(4)进行分析,由于XY区段正序故障电流同时受故障虚拟电源和IIDG影响,因此当故障程度较重时,区段不再是两端馈流,而是由系

统侧向 IIDG 侧穿越馈流,此时区段电流故障分量比相位接近 180° ,幅值存在较小的可能;当故障程度较轻时,故障点对 XY 区段的影响弱,由于系统电源远大于 IIDG 容量,其两端电流故障分量比的幅值和相位值均较小。

另外,考虑到环状配电网结构特殊性,当系统电源两侧负荷容量不同时,故障电流特征也存在差异。负荷差异与不同故障程度造成的影响相似:当故障点位于负荷较大侧时,故障点对非故障区段影响较强,对非故障母线区段可视为故障程度较重;反之,当故障点位于负荷较小侧时,对非故障母线区段可视为故障程度较轻。

对于故障程度较重的保护误动情况,主要集中在相位差接近 180° 而幅值较小的动作区,可以添加相位条件扩大制动区;对于故障程度较轻的保护误动情况,其相位和幅值特征变化范围不定,难以通过调整判据相幅条件提高保护可靠性。进一步对故障区段和误动区段分析,相比于正常运行状态, MN 区段两端故障电流幅值均增大:

$$\begin{cases} \left| \Delta \dot{I}_M \right| - \left| \dot{I}_M \right| > 0 \\ \left| \Delta \dot{I}_N \right| - \left| \dot{I}_N \right| > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, \dot{I}_M 、 \dot{I}_N 分别表示正常运行时流过保护点 M、N 的故障电流。

对于 XY 区段,由于 IIDG 主要向故障点馈流, Y 端故障电流减小;而系统侧电源向负荷 2 供应的电流增大,即

$$\begin{cases} \left| \Delta \dot{I}_X \right| - \left| \dot{I}_X \right| > 0 \\ \left| \Delta \dot{I}_Y \right| - \left| \dot{I}_Y \right| < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, \dot{I}_X 、 \dot{I}_Y 分别为正常运行时流过保护点 X、Y 的正序电流。

对比式(6)、(7)可知,故障区段两端正序故障电流变化趋势相同,而误动区段两端正序故障电流变化趋势相反,故据此能够可靠区分两者。

2 环状配电网电流差动保护方案

根据对环状有源配电网故障电流特性的分析,常规电流差动保护可靠性难以满足要求,故提出一

种适用环状结构的电流差动保护方案。利用区段两端故障电流比构造主保护判据,分别针对可能导致主保护误动的情况设置辅助判据。最后,设计完整的电流差动保护动作流程,并给出相邻保护点的详细保护动作逻辑。

2.1 主保护判据

在两端保护点上下游位置未知的情况下,将幅值比和相位差的计算方法保持统一:①幅值比计算时选择幅值较小一端做分子,即幅值比始终小于 1;②相位差计算时幅值较小一端相位值减去幅值较大一端相位值,再将结果变换为 $-\pi \sim \pi$ 。因此,幅值比 λ 和相位差 θ 表达式如下:

$$\lambda = \left| \frac{\Delta \dot{I}_1}{\Delta \dot{I}_2} \right| = \frac{\left| \Delta \dot{I}_1 \right|}{\left| \Delta \dot{I}_2 \right|}, \quad \left| \Delta \dot{I}_1 \right| \leq \left| \Delta \dot{I}_2 \right| \quad (8)$$

$$\theta = \arg \Delta \dot{I}_1 - \arg \Delta \dot{I}_2 + 2k\pi, \quad \theta \in [-\pi, \pi] \quad (9)$$

综合电流故障分量的幅值比和相位差特征设置的电流差动主保护判据如下:

$$\begin{cases} \lambda \leq \lambda_{\text{set}}, & \lambda < 1 \\ \left| \theta \right| \leq \left| \theta_{\text{set}} \right|, & \theta \in [-\pi, \pi] \end{cases} \quad (10)$$

式中, λ_{set} 为保护动作幅值边界; θ_{set} 为保护动作相位边界。

根据文 1.1 中分析可知,当发生区内故障时,保护区段两端电流故障分量幅值比小于 0.5,相位差变化范围最大为 130° 。考虑一定判据整定裕度,将保护动作幅值边界 λ_{set} 设定为 0.6,保护动作相位边界 θ_{set} 设定为 140° 。

2.2 辅助保护判据

根据文 1.2 中分析可知,环状配电网直接采用主保护判据易导致非故障母线区段的误动,因此,需要设置对应的辅助判据提高保护可靠性。

当故障程度较重或故障点位于负荷较大侧时,非故障母线区段故障电流比相位差接近 180° ,因此可进一步调整相位差判据范围,即辅助判据 I 为

$$\left| \theta \right| < 170^\circ, \quad \theta \in [-\pi, \pi] \quad (11)$$

当故障程度较轻或故障点位于负荷较小侧时,故障和误动区段两端正序电流故障分量存在差异:故障区段两端正序故障电流分量幅值均增大;误动区段靠近系统侧的正序故障电流分量幅值增大,靠近 IIDG 侧正序故障电流分量幅值减小。以此作为

辅助判据原理,定义 sgn 函数为

$$\text{sgn}(\Delta I - I) = \begin{cases} 1, \Delta I > I \\ 0, \Delta I \leq I \end{cases} \quad (12)$$

则辅助判据 II 为

$$\text{sgn}(\Delta I_1 - I_1) \cap \text{sgn}(\Delta I_2 - I_2) = 1 \quad (13)$$

式中, I_1 、 I_2 分别为保护区段两端保护启动时刻前 1~3 周波内正序故障电流分量幅值的平均值; ΔI_1 、 ΔI_2 分别为保护区段两端保护启动时刻后 1~3 周波内正序故障电流分量幅值的平均值。

2.3 电流差动保护流程

本文所提的改进电流差动保护方案完整流程如图 4 所示。安装在保护点处的电流互感器对电流进行检测,当过流检测结果异常时,向本保护点和相邻保护点装置发送启动信号。当保护装置获取

流经保护点的全相电流信息后,通过全周相减法滤除直流分量、基波和所有整次谐波,得到电流故障分量;然后对故障分量进行快速傅里叶变换,计算出正序电流故障分量。

相邻 2 个保护装置向对侧发送并接收对侧计算得到的正序电流故障分量信息,经处理得到对应保护区段的正序电流故障分量幅值比和相位差,代入主保护判据表达式(10)进行判断,若判断结果为区内故障,则通过式(11)、(13)进行判断,即不满足式(11)时判断为区外故障(故障程度较重),不满足式(13)时判断为区外故障(故障程度较轻);反之判断为区内故障,保护装置向断路器发送跳闸指令。由于故障区段端点同样为健全区段端点,因此保护点对跳闸指令取“并”逻辑,避免保护拒动。

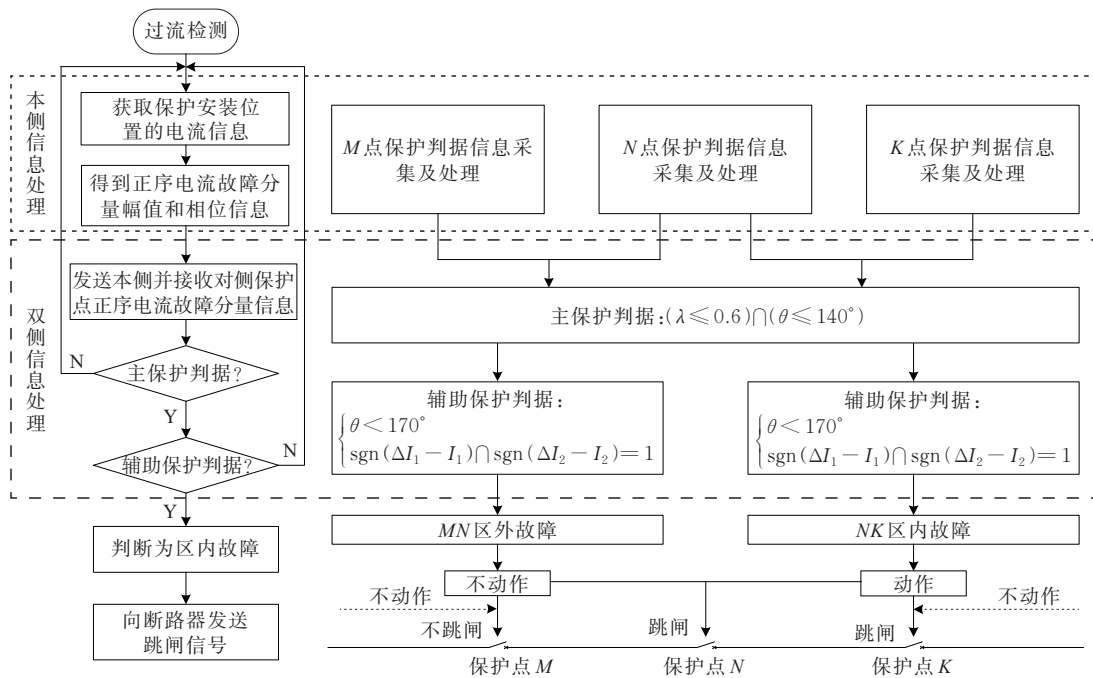


图 4 电流差动保护流程

Figure 4 The diagram of current differential protection process

3 仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建环状有源配电网模型(图 1),其中,系统侧变压器容量为 50 MV·A,变比为 110 kV/10.5 kV,负荷 1、2 容量均为 2 MV·A, IIDG 容量为 1 MV·A;馈线长度均为 8 km,

线路参数: $R=0.17 \Omega/\text{km}$, $X=0.34 \Omega/\text{km}$;故障点 f_1 设置在馈线中点,仿真验证中故障均设置在 1 s 时发生。

3.1 故障类型

为验证本文所提方案在不同故障类型下的性能,在环状配电网模型中 f_1 点设置单相接地、两相短路和三相短路故障,设置过渡电阻均为 0.01Ω 。此

外,在相同模型参数和故障条件下,将本文所提保护方案与常规电流差动保护方案进行对比,常规电流差动保护的判据^[10]为

$$|\dot{I}_1 + \dot{I}_2| > K |\dot{I}_1 - \dot{I}_2| \quad (14)$$

式中, $|\dot{I}_1 + \dot{I}_2|$ 为差动电流; $|\dot{I}_1 - \dot{I}_2|$ 为制动电流; K 为制动系数,此处取值为0.5。

仿真结果和方案对比情况如表1所示,可知对于环状有源配电网,本文所提保护方案在发生各类故障时,通过主保护判据能够正确区分绝大多数区内、外故障情况。但当 f_1 点发生单相接地故障时,表1中显示NK和XY区段均判断为区内故障,对于常规电流差动保护必然会发生误动情况,而本文所提保护方案还设有辅助判据I、II。

表1 环状配电网 f_1 点故障

Table 1 Types of faults occur at f_1 of the annular distribution network

保护区段	故障类型	幅值比/ p.u.	相位差/ (°)	本文方案	常规方案
MN	单相接地	0.772	172.1	区外	区外
	两相短路	0.930	174.6	区外	区外
	三相短路	0.983	178.5	区外	区外
NK	单相接地	0.967	12.4	区内	区内
	两相短路	0.633	6.1	区内	区内
	三相短路	0.594	3.3	区内	区内
YZ	单相接地	0.998	179.8	区外	区外
	两相短路	0.999	180.0	区外	区外
	三相短路	0.999	180.0	区外	区外
XY	单相接地	0.305	163.2	区内	区内
	两相短路	0.868	172.3	区外	区外
	三相短路	0.952	175.7	区外	区外

由于2个区段相位差判据均小于 170° ,辅助判据I仍无法区分,需进一步通过辅助判据II确定故障区段,NK和XY区段的辅助判据II如表2所示,可知NK区段两端故障电流均增大,XY区段系统侧电流增大,IIDG侧电流减小,与理论分析结果一致,能够有效避免保护误动。

表2 NK和XY区段辅助判据II

Table 2 NK and XY zone auxiliary criterion II

保护区段	保护点	$\text{sgn}(\Delta I - I)$	判断结果
NK	N	1	区内
	K	1	
XY	X	1	区外
	Y	0	

3.2 过渡电阻

故障程度与过渡电阻关系密切,且配电网中大多数故障为非金属性故障,因此,需要进一步验证所提保护方案的耐受过渡电阻能力。

以 f_1 点发生单相接地故障为例,中压配电网过渡电阻一般不超过 30Ω ^[10],故依次设置过渡电阻为10、20、30 Ω 。由于只有母线区段,即MN和XY区段,会存在保护误动可能,因此主要观测MN和XY区段,其对应判据信息分别如图5所示,可知当发生非金属性单相接地故障时,若采用常规电流差动保护,则MN和XY区段均会误动,且随着过渡电阻变大,MN区段判据在相幅平面上越靠近中心点。考虑常规电流差动保护特性,若扩大制动区则会提高保护拒动的风险,因此,常规电流差动保护难以有效提高环状配网中的耐受过渡电阻能力。

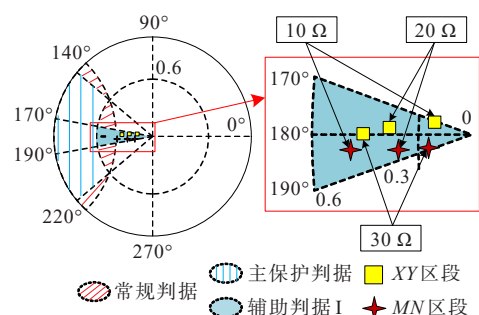


图5 过渡电阻耐受能力分布

Figure 5 The distribution of abilities to withstand transition resistance

若只采用本文所提的主保护判据,保护仍会发生误动,但此时MN和XY区段对应的相位差均大于 170° ,故不满足辅助判据I,判断为区外故障,避免了现有电流差动保护误动的情况,证明本文所提电流差动保护方案具有良好耐受过渡电阻能力。

3.3 噪声干扰

测量装置信噪比通常大于 30 dB^[20-21],且主要对幅值比判据造成较大影响,故以 f_1 点发生三相短路故障为例,在电流中加入 30 dB 的高斯白噪声后,各保护区段主保护判据的幅值比信息如图 6 所示,可知加入噪声后判据信息虽然受到影响,但计算值仍能够可靠分辨区内、外故障情况,不影响判据的判断结果,因此,所提电流差动保护方案有较好的抗噪声干扰能力。

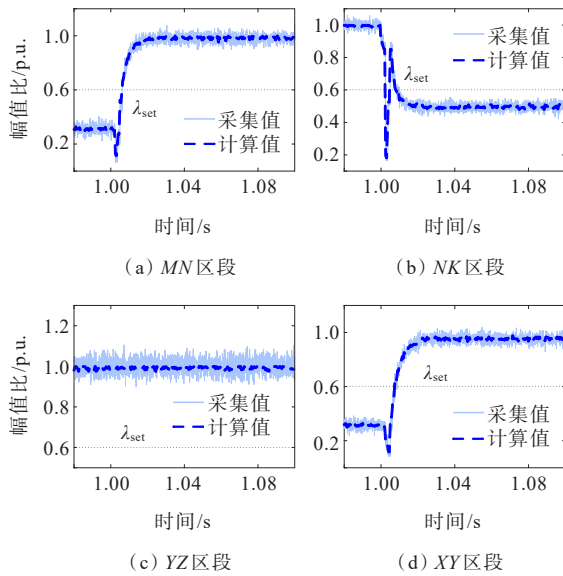


图 6 噪声对主保护幅值比判据的影响

Figure 6 The influence of noise on main protection amplitude ratio criterion

3.4 负荷容量差异

在以上环状配网仿真模型中设置负荷 1、2 容量相等,即系统电源两侧近似对称。当两侧负荷容量存在差异时,故障电流特性也会发生变化,故需考虑负荷容量差异对所提电流差动保护方案的影响。

当 f_1 点发生三相短路故障时,设置 2 种情况:① 负荷 1、2 分别为 1、5 MW;② 负荷 1、2 分别为 5、1 MW。对应的主保护判据信息如表 3 所示,可知当两侧负荷容量相差较大时,无论故障发生在大负荷侧或小负荷侧,主保护判据均可正确区分区内、外故障,进一步证明本文所提保护方案可以适应不均匀的负荷分布情况。

表 3 不同负荷容量的主保护判据

Table 3 Main protection criteria for different load capacities

负荷容量/ MW	保护 区段	幅值比/ p.u.	相位差/ (°)	判断 结果
1(负荷 1)	MN	0.990	179.3	区外
	NK	0.576	0.3	区内
	YZ	0.999	180.0	区外
5(负荷 2)	XY	0.890	169.6	区外
	MN	0.962	176.3	区外
	NK	0.512	5.6	区内
1(负荷 2)	YZ	0.999	180.0	区外
	XY	0.972	177.9	区外

3.5 故障点位置

为验证所提保护方案应用于馈线区段时是否存在死区,改变 f_1 点在馈线上的位置,以单相接地故障为例,仿真结果如表 4 所示,可知所提保护方案不受故障点位置影响,有较好的可靠性。

表 4 不同馈线故障位置时仿真结果

Table 4 Simulation results for different feeder fault locations

f_1 点到N点距离占 馈线 2 全长比例/%	保护区段	保护情况
12.5	NK	动作
	MN、YZ、XY	不动作
25.0	NK	动作
	MN、YZ、XY	不动作
75.0	NK	动作
	MN、YZ、XY	不动作
87.5	NK	动作
	MN、YZ、XY	不动作

3.6 常规辐射状配网适用性

搭建辐射状有源配电网模型,如图 7 所示,模型参数与图 1 的环状配电网一致。

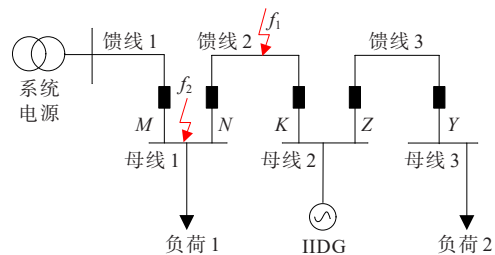


图 7 辐射状有源配电网

Figure 7 A radial active distribution network

基于辐射状有源配电网仿真模型,依次从故障位置、故障类型、耐受过渡电阻、抗噪能力以及负荷容量差异方面,对本文所提的电流差动保护性能进行验证,验证结果如表5所示,可知本文所提电流差动保护方案在典型的辐射状有源配电网中同样适用,且具备不受故障类型、耐受过渡电阻等多方面的良好性能,说明本文所提保护电流差动保护方案具有较好的配电网拓扑结构普适性。

表5 辐射状配电网中保护性能

Table 5 Protection capabilities in radial distribution networks

故障位置	保护区段	判断结果	是否误动	故障类型是否影响	耐受30Ω过渡电阻	抗30dB噪声干扰	负荷容量是否影响
f_1	MN 区内	否	否	否	是	是	否
	NK 区外	否	否	否	是	是	否
f_2	YZ 区外	否	否	否	是	是	否
	MN 区内	否	否	否	是	是	否
f_2	NK 区外	否	否	否	是	是	否
	YZ 区外	否	否	否	是	是	否

4 结语

由于拓扑结构的差异和分布式电源的接入,导致适用于辐射状配电网的常规电流差动保护方案应用于环状配电网时可靠性不足,本文针对此问题,提出了环状配电网改进电流差动保护方案。基于区内、外故障电流比的向量关系,设置了主保护判据和整定阈值,并针对可能存在的保护误动问题设置辅助判据。通过理论分析和仿真验证,可以得到以下结论:

- 1) 环状有源配电网发生故障后故障区段和健全区段电流故障分量的向量关系不同,具体关系与故障位置、故障程度以及负荷容量差异等有关;
- 2) 本文提出的电流差动保护方案不受故障类型的影响,具有一定的耐受过渡电阻和抗干扰能力,且保护性能不受系统电源两侧负荷容量差异和故障点位置的影响;
- 3) 本文所提的电流差动保护方案在辐射状配电网中仍适用,对不同配网结构有较好的普适性。

参考文献:

[1] 刘刚,朱林,祁升龙,等.基于拓扑结构变化的配电网自适应保护方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):106-112.
LIU Gang, ZHU Lin, QI Shenglong, et al. Adaptive protection method for distribution networks based on the dynamic topology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):106-112.

[2] 梅军,张丙天,朱鹏飞,等.基于故障电流主动控制的柔性直流配电网故障定位方法[J].电力系统自动化,2021,45(24):133-141.
MEI Jun, ZHANG Bintian, ZHU Feipeng, et al. Fault location method of flexible DC distribution network based on active control of fault current[J].Automation of Electric Power Systems,2021,45(24):133-141.

[3] SALEM M M., ELKALASHY N I, ATIA Y, et al. Modified inverter control of distributed generation for enhanced relaying coordination in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2017,32(1):78-87.

[4] 张健磊,高湛军,陈明,等.考虑复故障的有源配电网故障定位方法[J].电工技术学报,2021,36(11):2265-2276.
ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, CHEN Ming, et al. Fault location method for active distribution networks considering combination faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(11):2265-2276.

[5] 陈海东,蒙飞,赵磊,等.利用分布式电源注入信号的配电网故障性质识别技术[J].高压电器,2022,58(12):123-129.
CHEN Haidong, MENG Fei, ZHAO Lei, et al. Fault identification technology for distribution line based on distributed generation injection signal[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(12): 123-129.

[6] 娄为,沈冰,裘愉涛,等.钻石型配电网的保护与自愈策略分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):161-168.
LOU Wei, SHEN bin, QIU Yutao, et al. Protection and self-healing strategy analysis of a diamond type distribution network[J]. Power System Protection and Control ,2022,50(23):161-168.

[7] 陈晓龙,李永丽,赵曼勇,等.计及配电网电流保护整定原则的逆变型分布式电源准入容量计算[J].电力自动化设备,2016,36(6):156-162.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, ZHAO Manyong, et al. IBDG penetration level calculation considering current protection setting principle for distribution network[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 156-162.
- [8] 黄欣,孙雁斌.辐射状配电网电流保护范围在线分析方法[J].电力科学与技术学报,2017,32(4):102-107.
HUANG Xin, SUN Yanbin. Online analysis method of current protection range for radial distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4):102-107.
- [9] 黄景光,丁婧,郑淑文,等.高渗透率微网自适应电流保护方法研究[J].电力科学与技术学报,2017,32(1):37-42.
HUANG Jingguang, DING Jing, ZHENG Shuwen, et al. Research on adaptive current protection method for micro-grid with high penetration[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1):37-42.
- [10] 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 Yingyu, LU Zhengjie. Adaptive differential protection principle based on compensation coefficient for active distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(6):2268-2275.
- [11] 吴奕,顾乔根,崔玉,等.UPFC系统的变压器差动保护分析[J].电力工程技术,2021,40(1):99-106.
WU Yi, GU Qiaogen, CUI Yu, et al. Transformer differential protection in UPFC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1):99-106.
- [12] 孙玲玲,王宁,贾清泉,等.计及分布式光伏发电低电压穿越能力的主动配电网保护方法[J].电力自动化设备, 2018, 38(6):79-86.
SUN Lingling, WANG Ning, JIA Qingquan, et al. Protection method of active distribution network considering low voltage ride-through of distributed PV generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):79-86.
- [13] 马帅,武志刚,高厚磊,等.适配高渗透率DG接入配电网的幅值比较式保护[J].电力系统保护与控制,2019,47(4):43-50.
MA Shuai, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. Amplitude comparison protection for distribution network with high permeability distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4):43-50.
- [14] 朱妍,陆于平.含DG配网充分式优选制综合电流幅值差动保护[J].中国电机工程学报,2018,38(S1):68-74.
ZHU Yan, LU Yuping. Sufficient optimized comprehensive current amplitude differential protection for distribution network with distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1):68-74.
- [15] 翁嘉明,刘东,安宇,等.馈线功率控制下的主动配电网信息物理风险演化分析[J].中国电力,2021,54(3):13-22.
WENG Jiaming, LIU Dong, AN Yu, et al. Cyber-physical risk evolution analysis of active distribution network under feeder control error[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 13-22.
- [16] 刘世明,赵永森,王波,等.基于光学电流互感器的有源配电网相差保护方案[J].电力系统自动化,2022,46(22): 173-181.
LIU Shiming, ZHAO Yongsen, WANG Bo, et al. Phase difference protection scheme of active distribution network based on optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 173-181.
- [17] 陈建坤,张璨,许洪华,等.“边端融合”架构下配电系统全域选择性保护的仿真研究[J].智慧电力,2022,50(3):80-86.
CHEN Jiankun, ZHANG Can, XU Honghua, et al. Simulation research on global selective protection technology of distribution system with edge-terminal integration architecture[J]. Smart Power, 2022, 50(3):80-86.
- [18] 陈建平,桑林卫,汤拓,等.自适应幅值比的有源配电网差动保护方案[J].电测与仪表,2021,58(10):29-35.
CHEN Jianping, SANG Linwei, TANG Tuo, et al. Adaptive distribution network differential protection scheme with adaptive amplitude ratio[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10):29-35.
- [19] 陈桥山.含逆变型分布式电源配电网故障选线方案研究[D].长沙:长沙理工大学,2020.
CHEN Qiaoshan. Studies on faulty feeder selection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.
- [20] 胡蓓,肖浩,李建光,等.光纤电流互感器的噪声分析与信噪比优化设计[J].高电压技术,2017,43(2):654-660.
HU Bei, XIAO Hao, LI Jianguang, et al. Noise analysis and snr optimization design of fiber optical current transformers[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 654-660.
- [21] 桂小智,蒙天赐,潘本仁,等.基于模型识别相关性的光伏发电并网联络线纵联保护[J].电网与清洁能源, 2022, 38(12): 131-137.
GUI Xiaozhi, MENG Tianci, PAN Benren, et al. Pilot protection of the tie-line of photovoltaic power generation based on model identification correlation[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12): 131-137.