

考虑逆变型 DG 故障穿越的交流微网 反时限保护

王德明¹, 李英量², 贾俊辉³, 解晨¹, 王语园¹

(1. 陕西铁路工程职业技术学院 铁道动力学院, 陕西 渭南 714000;

2. 西安石油大学 电子工程学院, 陕西 西安 710065;

3. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 由于分布式电源(DG)提供的故障电流水平很低, 传统的过流保护方案不再适用于微网故障检测。基于测量阻抗变化的保护方案因其较高的灵敏性和适应性, 可作为交流微网的保护方案。但是, 现有的此类方案未考虑逆变类 DG(IIDG)的故障穿越要求, 且动作性能易受过渡电阻的影响。为此, 提出了一种新的交流微网反时限距离(ITD)保护。新方案利用反时限动作特性方程设定保护动作时间, 可同时满足 IIDG 故障穿越和馈线保护选择性的要求。针对过渡电阻和分支馈入的影响, 提出了利用相邻保护装置交互信息以提高 ITD 保护性能的方法。利用 Matlab/Simulink 进行时域仿真, 仿真结果验证了所提方案的有效性。

关键词: 微网; 反时限距离保护; 馈线保护; 故障穿越

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23949

Inverse-time Distance Protection for AC Microgrids Considering Fault Ride-through of Inverter-interfaced Distributed Generation

WANG Deming¹, LI Yingliang², JIA Junhui³, XIE Chen¹, WANG Yuyuan¹

(1. College of Rail Power, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shaanxi, China; 2. School

of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

3. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: The conventional overcurrent protection is ineffective in isolating faults in microgrids due to the low fault current level contributed by distributed generations (DGs). Because of its high agility and adaptability, the measured impedance-based protection schemes are considered as common alternatives to detect faults. However, the fault ride-through (FRT) requirements are not considered in the existing schemes, and action performance is susceptible to transition resistance. To solve the problem, a new inverse-time distance (ITD) protection scheme for AC microgrids was proposed. The proposed scheme used the inverse-time characteristics to set the operating time, which can meet the FRT requirements of inverter interfaced DGs (IIDGs) as well as the selectivity of feeder protection system. In response to the influence of transition resistance and branch feed-in, a method was developed to improve the performance of ITD protection, which was based on transmitting signals between adjacent relays. Time domain simulations were conducted in Matlab/Simulink and the effectiveness of the proposed protection scheme was verified by the results.

Key words: microgrid; inverse-time distance (ITD) protection; feeder protection scheme; fault ride-through (FRT)

微网集分布式电源(distributed generation, DG)、储能装置和用户负荷于一体,具有降低传输损耗、提高电能质量、优化电源配置、提升系统可靠性等诸多优势,受到大家的普遍关注^[1-2]。但小

基金项目: 渭南市 2019 年重点研发科技计划项目(2019-ZDYF-JCYJ-127); 陕西铁路工程职业技术学院科研

基金项目(KY2021-56); 陕西铁路工程职业技术学院教育教学研究项目(2021JG-22);

陕西铁路工程职业技术学院电能质量科技创新团队项目(KJTD202104)

作者简介: 王德明(1989—), 男, 硕士, 工程师, Email: deming.w@qq.com

容量的DG和短距离的供电半径,给传统电流保护在微网中的应用带来挑战^[3-4]。

一方面,不论是机组类DG还是逆变类DG(inverter interfaced DG, IIDG),其容量一般较小,提供的短路电流水平有限。特别是IIDG,受逆变器过热保护的限制,其输出的故障电流幅值最大不超过额定电流的1.2~2倍^[4]。较低的短路电流水平将降低传统电流保护在微网中应用的灵敏性。另一方面,微网直接连接用户,供电半径较短,发生故障时上下级馈线短路电流相当。依据电流值动作的传统电流保护难以保证其选择性。此外,DG的随机性、间歇性以及微网运行方式的不确定性,都将增加传统电流保护在微网中应用的难度。

为解决微网保护中存在的问题,学者们进行了大量研究^[5-14]。文献[5-6]提出通过设置中央保护单元对全网信息进行处理和判断的自适应电流保护方案。文献[7]基于分割区域的概念提出了微网边方向变化量保护方案,文献[8]考虑IIDG低电压穿越提出利用正序故障分量相位关系检测微网故障的方法,两种方案均基于对微网多地信息的处理和判断。文献[9-10]将故障后的电压变化量引入反时限电流保护动作方程,提出了电压修正反时限电流保护方案。然而,以上方案对网络拓扑、系统运行方式和通信系统的依赖性较强。基于测量阻抗变化的保护方案具有较强的适应性且不受系统运行方式变化的影响,具有重要的研究价值^[11-14]。文献[11]基于测量导纳的变化,首先提出含DG配电网的反时限导纳保护方法。文献[12]考虑故障时负荷阻抗的变化,提出了一种微网反时限低阻抗保护方案。文献[13]综合故障前后测量导纳的幅值和相角变化量,提出了基于测量导纳的微网故障检测方法。但是,上述方案均未考虑IIDG故障穿越对保护动作时间的要求,且所提保护动作性能易受过渡电阻和分支馈入的影响。

为此,本文提出了一种新的微网反时限距离(inverse-time distance, ITD)保护方案。新方案基于故障后馈线测量阻抗的变化,通过设定保护动作特性曲线来满足IIDG故障穿越和保护选择性要求。考虑微网结构特点,采用相邻保护交互信息以消除过渡电阻和分支馈入对测量阻抗的影响。利用Matlab/Simulink建立微网模型并进行保护动作仿真分析,仿真结果验证了所提方案的有效性。

1 IIDG故障穿越要求

为保证微网供电可靠性和稳定性,IIDG应当在系统发生故障时输出无功以动态支撑电压,即IIDG应当具备故障穿越的能力^[8]。

图1所示为典型的光伏电源故障穿越要求^[15],图中曲线为故障后光伏电源持续运行时间和并网点(point of common coupling, PCC)电压之间的相互关系。并网点电压(U_{PCC})跌落幅值越大,光伏电源持续运行时间越短。从图1中可以看出,当光伏电源并网点电压在额定电压的20%~90%时,光伏电源将以0.15~2.00 s的时间脱网;当并网点电压低于额定电压的20%时,脱网时间不大于0.15 s。

光伏电源是典型的IIDG,且其容量相对不大。因此,当含IIDG微网系统发生故障时,IIDG并网母线处电压会出现明显的电压降低,可能出现IIDG先于馈线保护动作脱网的情况,降低系统供电的可靠性。同时,当馈线保护动作时间比IIDG故障穿越时间长时,IIDG会先于保护动作而脱网,从而导致馈线保护的灵敏性和选择性进一步降低,危及系统安全稳定运行。所以,微网馈线保护须考虑IIDG故障穿越对保护动作时间的要求,且馈线保护动作时间须短于IIDG故障穿越时间。世界各国对IIDG故障穿越规定虽存在一定差异,但并网点电压跌落至0时穿越时间一般为0.15 s^[16]。

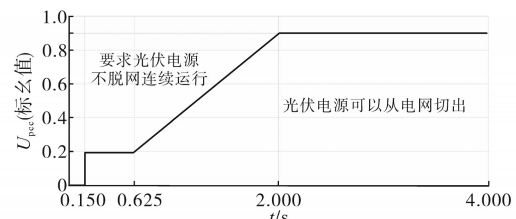


图1 光伏发电故障穿越要求

Fig.1 Fault-ride-through requirements of photovoltaic generation

2 ITD保护原理及动作特性

现有的基于测量阻抗变化的微网馈线保护未考虑IIDG故障穿越对保护动作时间的要求。本文将馈线测量阻抗引入反时限保护动作特性方程并考虑IIDG故障穿越,提出一种新的ITD微网保护方案。

2.1 ITD保护原理及动作特性

2.1.1 一段保护

反时限保护特性的优点是保护动作时间依赖于故障点位置,故障点离电源点越近,保护动

作时间越短^[9,17]。本文基于故障后馈线测量阻抗减小这一特征,将测量阻抗引入反时限动作特征方程。考虑馈线保护动作时间须尽可能短,满足IIDG故障穿越要求,反时限特性曲线形状系数取为2。设定的ITD一段保护特性如下:

$$t_I = A_I / [l(kZ_I)/Z_m]^2 - 1] \quad (1)$$

式中: t_I 为ITD一段保护动作时间; A_I 为时间相关系数; k 为可靠系数,本文取1.2以保护馈线全长; Z_I 为一段保护范围内的馈线正序阻抗; Z_m 为保护安装处测得的阻抗值。

当 $|1.2Z_I/Z_m|>1$ 时ITD一段保护满足启动条件。

本文主要研究中压微网系统的相间短路故障。式(1)中的测量阻抗为相间测量阻抗,可由相间电压、电流进行计算:

$$Z_m = V_{p-p} / I_{p-p} \quad (2)$$

式中: V_{p-p} 、 I_{p-p} 分别为故障相间电压和相间电流的有效值。

从动作特性方程式(1)可以看出,ITD一段保护可保护馈线全长。为保证下级馈线首端故障时保护具有选择性,上下级馈线首端保护之间须通过时阶进行配合。时阶一般设定为0.3 s^[10,12],即

$$t_I (Z_m = A_I) = 0.3 \quad (3)$$

由式(1)、式(3)可得 A_I 为0.132,该系数与馈线长度无关。由此可得,当 $Z_m=87.5\%Z_I$ 时, $t_I=0.15$ s,即对距离馈线首端87.5%的短路故障,ITD保护可以不大于0.15 s的时间切除故障,满足IIDG故障穿越的要求。

以图2所示系统中馈线AB发生故障为例说明所提ITD保护动作特性。两台IIDG分别在母线B和母线C处接入系统,各馈线首末两端均配置ITD保护。

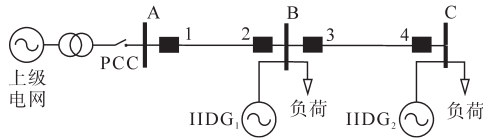


图2 简单微网接线图

Fig.2 Wiring diagram of simplified microgrid

微网ITD一段保护动作时间和故障位置的关系如图3所示,其中,故障位置为故障点距离馈线首端的长度与总长度的百分比。

各保护之间配合情况如下:

1)故障发生在区域1时,保护1瞬时动作、保护2延时0.15~0.30 s动作。由于此时故障点离IIDG较远,IIDG故障穿越时间大于0.30 s,故保护1和保护2满足IIDG故障穿越要求。

2)当故障发生在区域2时,保护1和保护2动作均不大于0.15 s,满足IIDG故障穿越要求。

3)当故障发生在区域3时,保护2瞬时动作,满足IIDG故障穿越要求。

从以上分析可知,当故障点位于馈线长度的87.5%范围内时,所提ITD一段保护动作时间不大于0.15 s,满足IIDG故障穿越的要求。

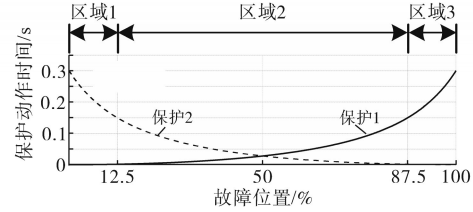


图3 ITD一段保护动作特性

Fig.3 Characteristics of ITD protection (section 1)

2.1.2 二段保护

设计ITD二段保护以为相邻馈线提供后备保护。ITD二段保护同样采用反时限动作特性:

$$t_{II} = A_{II} / [l(kZ_{II})/Z_m]^{0.02} - 1] \quad (4)$$

式中: t_{II} 为ITD二段保护的動作时间; A_{II} 为时间相关系数; Z_{II} 为一、二段保护保护范围内馈线的正序阻抗值。

ITD二段保护设定为相邻馈线的远后备保护,保护范围延伸到下级馈线的全长。

当 $|1.2Z_{II}/Z_m|>1$ 时,二段保护启动,本段馈线二段保护和相邻馈线一段保护通过时阶进行配合。时阶设定为0.3 s,即

$$t_{II} (Z_m = Z_I) = 0.3 \quad (5)$$

系数 A_{II} 只和一、二段保护范围有关。可由式(4)、式(5)得到:

$$A_{II} = 0.3 [l(1.2Z_{II})/Z_I]^{0.02} - 1] \quad (6)$$

以图2所示系统为例进一步说明所提ITD保护的動作特性。馈线BC长度取为馈线AB长度的1.2倍,ITD保护動作时间随故障位置的变化如图4所示,各保护之间配合情况如下:

1)馈线AB段发生短路故障时,保护1、保护2配置的ITD一段保护作为主保护首先动作清除故

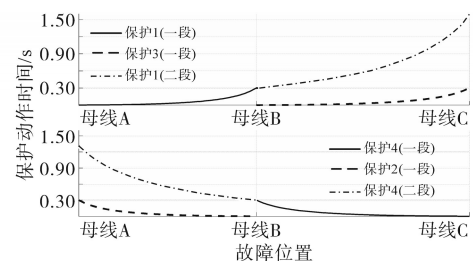


图4 ITD保护配合示意图

Fig.4 Coordination of ITD protection

障,保护动作时间满足IIDG故障穿越要求。

2)当馈线AB的主保护未能有效隔离故障时,保护4配置的ITD二段保护将作为远后备保护再次动作清除故障。

3)馈线BC段发生故障的情况与馈线AB段类似,此时,保护1配置的ITD二段保护作为馈线BC段的远后备保护。

从图中可以看出,ITD一段保护既可以满足IIDG故障穿越对馈线保护动作时间的要求,还可以满足保护选择性的要求;ITD二段保护以最小0.3 s的延时与相邻馈线一段保护配合清除故障。

从ITD方程式(1)、式(4)可以看出,由于所提ITD保护采用阻抗模值进行计算,保护安装处两侧故障均会满足ITD保护动作要求。为此,本文提出了基于ITD保护的故障方向判别方法。

2.2 方向判定

ITD保护可以反映保护安装处两侧的故障,所以馈线故障后终端母线两侧ITD保护均会动作,降低了保护动作的可靠性。为此,需要对故障方向进行检测。由于保护安装处所在馈线发生故障后,馈线两侧ITD一段保护均会启动,而相邻馈线只会启动远侧的ITD二段保护,以此为判据可构成微网故障方向判别方法,如图5所示。

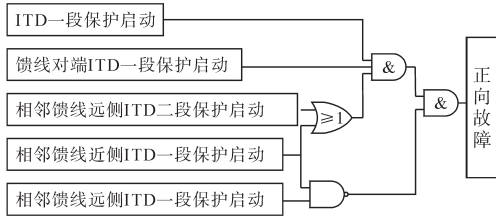


图5 基于ITD保护的故障方向判别方法
Fig.5 Detection method of the fault direction

3 交流微网ITD保护方案

根据上述所提ITD保护方法,本文提出了交流微网ITD保护方案。由于基于测量阻抗变化的保护方法易受过渡电阻和分支馈入的影响,所以需要首先讨论解决该方法的方法。

3.1 减小过渡电阻影响的方法

针对测量阻抗易受过渡电阻影响的问题,考虑到微网中馈线长度一般较短、相邻保护装置之间易于实现信息交互^[18-19],本文提出一种新方法以提高ITD保护的抗过渡电阻能力。

3.1.1 减小过渡电阻影响的方法

图6所示系统,电源1,2分别接于母线M,N,假设馈线MN上f点处发生相间短路故障。 Z_{Mf} ,

Z_{Nf} 分别为母线M、母线N和故障点f之间馈线的阻抗, R_f 为故障点f处实际的过渡电阻, I_M, I_N 分别为故障时两侧电源注入的短路电流。

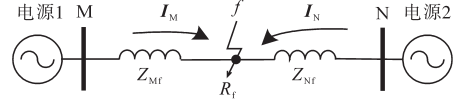


图6 过渡电阻对测量阻抗的影响

Fig.6 Effect of fault resistance on measured impedance

f点发生故障时,母线M,N处的正序测量阻抗可分别表示为

$$Z_{m(M)} = Z_{Mf} + (\alpha I_N / I_M + 1) R_f \quad (7)$$

$$Z_{m(N)} = Z_{Nf} + (\alpha I_M / I_N + 1) R_f \quad (8)$$

式中: α 为故障类型系数,三相短路和两相短路分别取1和1/2。

可以看出,在过渡电阻的影响下测量阻抗将出现附加阻抗,且附加阻抗与故障点处过渡电阻和故障电流有关。由于微网中IIDG在其控制策略的影响下输出故障电流的相位存在不确定性^[10],故附加阻抗可能为容性或者感性,容易造成保护不动作或者稳态超越。在这种情况下,传统的消除过渡电阻影响的方法可能失效。为此,本文提出了一种新方法减小微网中过渡电阻对测量阻抗的影响。

由于 Z_{Mf} 与 Z_{Nf} 之和为整个馈线MN的正序阻抗 Z_{MN} ,该值已知,故联立(7)、式(8)可得消除过渡电阻影响的测量阻抗值如下:

$$Z_{m(M)}^c = Z_{m(M)} - (\alpha I_N / I_M + 1) R_f^c \quad (9)$$

$$Z_{m(N)}^c = Z_{m(N)} - (\alpha I_M / I_N + 1) R_f^c \quad (10)$$

其中

$$R_f^c = \frac{Z_{m(M)} + Z_{m(N)} - Z_{MN}}{\alpha I_N / I_M + \alpha I_M / I_N + 2}$$

式中: R_f^c 为过渡电阻的计算值。

将该值替代保护装置实际测得的馈线阻抗值 $Z_{m(M)}$ 和 $Z_{m(N)}$,可减小过渡电阻存在对测量阻抗造成的影响。

当电源2退出运行时,过渡电阻的计算值可通过下式求得:

$$R_f^c = V_N / I_M \quad (11)$$

式中: V_N 为电源1侧母线N电压。

3.1.2 减小分支馈入影响的方法

由于微网中用户的分散性,常存在馈线T接的情况。当馈线存在分支且有分支馈入时,馈线两端的测量阻抗也会受到影响。图7所示为一馈线有分支馈入的情况,电源3通过分支(正序阻抗表示为 Z_p)接入馈线MN。馈线MN发生相间短路

故障时,电源3馈入的电流表示为 I_p 。 Z_{MP} , Z_{Pf} 和 Z_{Nf} 分别为母线M与馈线分支点、分支点与故障点 f 以及母线N与故障点之间馈线的正序阻抗。

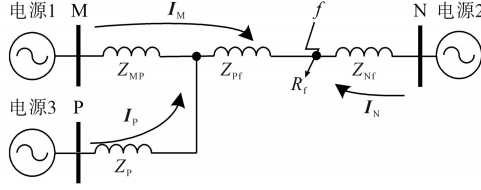


图7 分支馈入对测量阻抗的影响

Fig.7 Effect of branch infeed on measured impedance

f 点发生相间短路故障,母线M,N,P处的测量阻抗可分别表示为

$$Z_{m(M)} = Z_{MP} + (\alpha I_p / I_M + 1) Z_{Pf} + (\alpha I_p / I_M + \alpha I_N / I_M + 1) R_f \quad (12)$$

$$Z_{m(N)} = Z_{Nf} + (\alpha I_M / I_N + \alpha I_p / I_N + 1) R_f \quad (13)$$

$$Z_{m(P)} = Z_b + (\alpha I_M / I_P + 1) Z_{Pf} + (\alpha I_M / I_P + \alpha I_N / I_P + 1) R_f \quad (14)$$

采用与3.1.1节中所提方法同样的思路,分支点与故障位置之间阻抗的计算值和过渡电阻的计算值分别可通过下式进行计算:

$$Z_{Pf}^c = (M \cdot P - K \cdot N) / (J \cdot P - K \cdot L) \quad (15)$$

$$R_f^c = (J \cdot N - M \cdot L) / (J \cdot P - K \cdot L) \quad (16)$$

其中

$$M = Z_{m(P)} - Z_P$$

$$N = Z_{m(M)} + Z_{m(N)} - Z_{MN}$$

$$J = \alpha I_M / I_P + 1$$

$$K = \alpha I_M / I_P + \alpha I_N / I_P + 1$$

$$L = \alpha I_p / I_M$$

$$P = \alpha I_p / I_M + \alpha I_N / I_M + \alpha I_p / I_N + \alpha I_M / I_N + 2$$

消除过渡电阻和分支馈入影响的测量阻抗可通过下式计算得到:

$$\begin{cases} Z_{m(M)}^c = Z_{m(M)} - (\alpha I_p / I_M + 1) Z_{Pf} + (\alpha I_p / I_M + \alpha I_N / I_M + 1) R_f \\ Z_{m(N)}^c = Z_{m(N)} - (\alpha I_M / I_N + \alpha I_p / I_N + 1) R_f \\ Z_{m(P)}^c = Z_{m(P)} - (\alpha I_M / I_P + 1) Z_{Pf} + (\alpha I_M / I_P + \alpha I_N / I_P + 1) R_f \end{cases} \quad (17)$$

采用上述方法,可减小分支馈入和过渡电阻对测量阻抗的影响。

3.2 交流微网ITD保护方案

基于所提方法,图8给出交流微网ITD保护动作流程。

1)保护启动后检测相邻装置之间的信号传输通道有无异常。

2)若信道正常,则按照本文3.1节所提方法计算消除过渡电阻和分支馈入影响的测量阻抗值;若信道异常,可采用文献[20]中提到的不需要

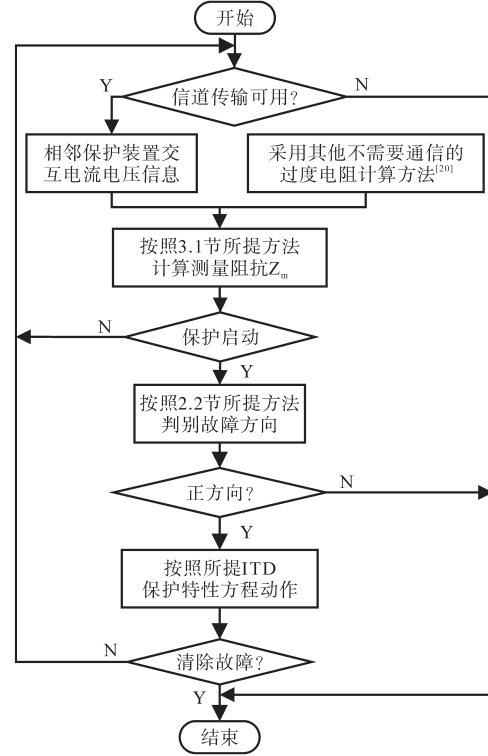


图8 交流微网ITD保护方案流程图

Fig.8 Flowchart of ITD protection scheme for AC microgrids 通信的过渡电阻计算方法。

3)根据计算得到的测量阻抗值判定微网故障方向。若为正向故障,按照所提ITD保护特性方程动作;若为反向故障,退出保护动作程序。

4)当 $|1.2Z_f/Z_m| > 1$ 时,满足ITD一段保护动作的条件,此时按照一段保护的动特性动作;若 $|1.2Z_{II}/Z_m| > 1$,则ITD二段保护启动。由于二段保护和相邻馈线一段保护通过时阶进行配合,所以满足选择性要求。

微网中馈线长度一般较短,应用以太网、光纤或者其他载波通道可以方便地实现相邻保护装置之间的信息交互;对长度在5 km内的馈线,传输延时不大于10 ms^[18,21],不影响ITD保护动作时间。此外,相较于差动保护,该方案不需要同步对时装置,通信设施投资相对较低。因此,所提方案实用性和适应性较强。

4 仿真验证

为验证本文所提方案的有效性,搭建了图9所示交流微网Matlab/Simulink仿真模型。微网系统电压为10 kV,可在孤岛和并网两种方式下运行。同步机DG(synchronous machine DG, SMDG), IIDG₁, IIDG₂和IIDG₃通过母线接入系统,输出功率分别为0.8 MW, 0.5 MW, 0.5 MW和0.4 MW。

SMDG 和 IIDG 仿真模型分别选择小功率同步电机和光伏电源。微网孤岛运行时, SMDG 采用 V_f 控制方式, 其余 IIDG 采用 PQ 控制方式; 微网并网运行时, 所有 DG 均采用 PQ 控制方式。馈线 AB, BC, CD, AE 和 BE 为同型架空线路, 长度分别为 3 km, 1.5 km, 2 km, 2 km 和 3 km。线路每 km 正

序电阻、电抗分别为 0.17Ω 和 0.38Ω 。

各母线处接入功率为 $0.4 \text{ MW} \sim 0.8 \text{ MW}$ 不等的用户负荷, 功率因数 0.85 (滞后)。馈线两侧均配置 ITD 保护, 保护之间的通信联络关系如图 9 中虚线箭头所示。保护通过采用快速傅里叶变换提取电压、电流的基波有效值计算测量阻抗。

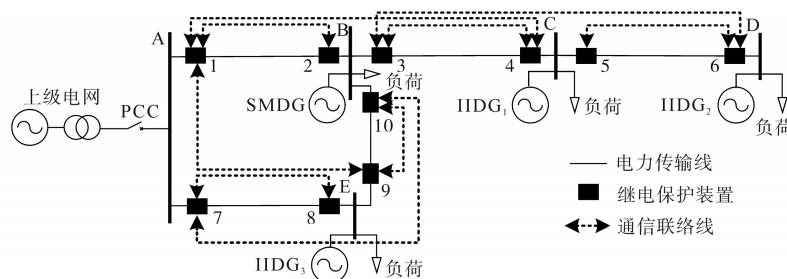


图9 10 kV交流微网

Fig.9 10 kV AC microgrids

4.1 孤岛运行

在微网孤岛运行方式下, 对馈线发生相间短路故障进行仿真分析。故障发生时刻设为 0.06 s , 过渡电阻 R_f 分别设置 0.01Ω , 5Ω 和 10Ω 。以馈线 BC 长度 12.5% 处发生两相短路故障为例。图 10 分别为馈线 BC 故障时保护 3 和保护 4 处测得的电压和电流的变化。从图中可以看出:

1) 微网孤岛运行方式下故障电流由 DG 提供, 短路电流水平较低, 采用传统的过流保护方案不能有效检测并清除故障。

2) 流过保护 3 的故障电流由 SMDG 和 IIDG₃ 提供, 由于 SMDG 功率较大, 故障电流表现出两相短路故障的特征。

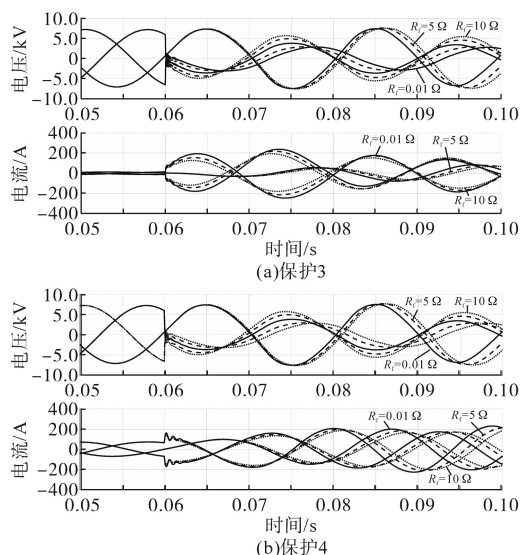


图10 馈线BC长度12.5%处两相短路故障时保护3,4处的电压、电流仿真结果

Fig.10 Simulation results of voltage and current at protection 3,4 during a line-to-line fault occurring at 12.5% of the feeder BC

3) 流过保护 4 的故障电流由 IIDG₁ 和 IIDG₂ 提供, 由于 IIDG 采用正序电压控制的限流策略, 故障电流表现出对称短路故障的特征。

采用本文所提消除过渡电阻影响的方法, 故障后保护 3 和保护 4 处测量阻抗的变化如图 11 所示。图中曲线分别代表过渡电阻为 0.01Ω , 5Ω 和 10Ω 时测量阻抗的变化轨迹, 故障后测量阻抗经 $1 \sim 2$ 周波进入期望区域。

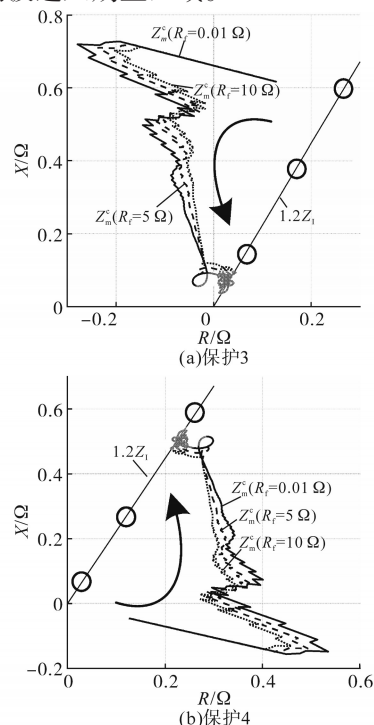


图11 故障后保护3和保护4测量阻抗的变化轨迹

Fig.11 Trajectory of the measured impedance changing in protect 3,4 after failure

保护 3,4 在馈线 BC 长度 12.5% 发生相间短路故障时的测量阻抗值分别为

$$\begin{aligned} Z_{m(3)} &= 12.5\% \times Z_{BC} = 0.125 \times 1.5 \times (0.17 + j0.38) \\ &= 0.03 + j0.07(\Omega) \\ Z_{m(4)} &= 87.5\% \times Z_{BC} = 0.875 \times 1.5 \times (0.17 + j0.38) \\ &= 0.22 + j0.50(\Omega) \end{aligned}$$

与图11中的仿真结果也基本一致,从而验证了本文所提消除过渡电阻影响方法的有效性。

保护3和保护4在得到无过渡电阻影响的测量阻抗值后计算ITD一段保护启动的边界条件 $|1.2Z_I/Z_m|$ 。当主保护未能及时隔离故障,保护1,9,6计算ITD二段保护启动的边界条件 $|1.2Z_{II}/Z_m|$ 并判断是否出口动作清除故障。馈线BC长度12.5%处两相短路故障时各保护启动边界条件如表1中所示。

从表中可以看出,保护3,4计算得到的 $|1.2Z_I/Z_m|>1$,一段保护启动;保护1,9,6计算得到的 $|1.2Z_I/Z_m|<1$, $|1.2Z_{II}/Z_m|>1$,一段保护未启动,二

段保护启动。根据2.2节故障方向的判别方法,判定为正方向故障。最后,按照所提ITD保护动作特性方程计算保护动作时间并出口动作。

表1 各保护启动的边界条件

Tab.1 Boundary conditions during each protection start						
保护位置	$ 1.2Z_I/Z_m $			$ 1.2Z_{II}/Z_m $		
	$R_f=0.01 \Omega$	$R_f=5 \Omega$	$R_f=10 \Omega$	$R_f=0.01 \Omega$	$R_f=5 \Omega$	$R_f=10 \Omega$
3	10.660	9.268	7.920			
4	1.252	1.378	1.414			
1	0.001	0.009	0.050	1.699	1.640	1.592
9	0.001	0.008	0.016	1.671	1.623	1.609
6	0.001	0.008	0.011	1.171	1.190	1.220

表2给出了孤岛方式下馈线BC长度12.5%处和87.5%发生相间短路故障时各保护动作时间的仿真结果。

表2 孤岛方式下馈线BC相间短路时的仿真结果

Tab.2 Simulation results during a line-to-line fault occurring on the feeder BC (islanded)

故障位置	保护位置	ITD 主保护动作时间/s				保护位置	ITD 后备保护动作时间/s			
		仿真结果			计算结果		仿真结果			计算结果
		$R_f=0.01 \ \Omega$	$R_f=5 \ \Omega$	$R_f=10 \ \Omega$			$R_f=0.01 \ \Omega$	$R_f=5 \ \Omega$	$R_f=10 \ \Omega$	
12.5%	3	0.001	0.002	0.002	0.001	1	0.376	0.403	0.428	0.380
						9	0.387	0.411	0.418	0.380
	4	0.150	0.147	0.132	0.150	6	1.142	1.468	1.074	1.100
87.5%	3	0.143	0.126	0.119	0.150	1	1.252	1.030	1.289	1.100
						9	0.319	0.318	0.311	0.310
	4	0.002	0.002	0.003	0.001	6	1.142	1.468	1.074	1.100

从表2中可以看出,仿真结果与计算结果基本一致,ITD一段保护对被保护馈线长度87.5%内的故障可以最大0.15 s的时间检测并隔离故障,满足IIDG故障穿越对保护动作时间的要求;ITD二段保护延时动作,可与相邻馈线一段保护协调动作清除故障;分支馈入和过渡电阻存在时,保护动作时间几乎不受影响,所提ITD保护方

案具有较强的适应性。

4.2 并网运行

为验证所提ITD保护方案在微网不同运行方式下的适应性,对图9所示系统在并网状态下进行仿真实验。仿真条件与孤岛运行方式下相同,故障类型选择相间短路故障,保护动作时间的仿真结果如表3中所列。

表3 并网方式下馈线BC相间短路时的仿真结果

Tab.3 Simulation results during a line-to-line fault occurring on the feeder BC (grid-connected)

故障位置	保护位置	ITD 主保护动作时间/s				保护位置	ITD 后备保护动作时间/s			
		仿真结果			计算结果		仿真结果			计算结果
		$R_f=0.01\ \Omega$	$R_f=5\ \Omega$	$R_f=10\ \Omega$			$R_f=0.01\ \Omega$	$R_f=5\ \Omega$	$R_f=10\ \Omega$	
12.5%	3	0.001	0.002	0.002	0.001	1	0.370	0.378	0.379	0.380
						9	0.375	0.381	0.382	0.380
	4	0.151	0.142	0.134	0.150	6	0.853	0.793	0.744	0.850
87.5%	3	0.144	0.151	0.150	0.150	1	0.851	0.843	0.805	0.850
						9	0.866	0.852	0.816	0.850
	4	0.002	0.001	0.001	0.001	6	0.308	0.296	0.290	0.310

从表中可以看出,仿真结果与计算结果基本一致,从而验证了所提ITD保护方案在并网运行方式下也可有效检测并隔离故障。

传统的基于测量阻抗变化的微网保护方案多未考虑IIDG故障穿越对保护动作时间的要求,且保护动作性能易受过渡电阻和分支馈入的影响。经过建模和仿真分析,本文所提ITD馈线保护方案考虑了IIDG故障穿越对保护动作时间的要求,且馈线保护动作时间短于IIDG故障穿越的时间;所提采用相邻保护交互信息消除过渡电阻影响的方法具有较强的适应性。

5 结论

针对现有基于测量阻抗变化的微网保护方案未考虑IIDG故障穿越且易受过渡电阻影响的问题,本文提出了一种新的微网ITD保护方案。与现有的基于测量阻抗变化的保护方案相比,所提ITD保护方案具有如下优点:

1) ITD保护可以检测微网中较低短路电流水平的故障,灵敏性高、适应性强。

2) 上下级馈线ITD保护通过时阶配合,在满足IIDG故障穿越对保护动作时间要求的同时,满足保护选择性的要求。

3) 利用相邻保护交互信息实时计算测量阻抗的方法可以减小过渡电阻和分支馈入的影响,提升ITD保护性能。

本文主要研究了中压微网的保护方案,对低压微网保护和快速傅里叶算法变换提取基波分量存在误差问题的研究将在下一步工作中展开。

参考文献

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
Yang Xinfu, Su Jian, Lü Zhipeng, *et al.* Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] Hooshyar A, Iravani R. Microgrid protection[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1332-1353.
- [3] 王书征,李先允.基于峰值功率简化估计的光伏阵列多峰MPPT策略[J].电气传动,2018,48(12):69-75.
Wang Shuzheng, Li Xianyun. Multiple peak maximum power point tracking strategy for PV array based on simplified power estimation[J]. Electric Drive, 2018, 48(12): 69-75.
- [4] 张铭路,刘海涛,王新宝.光伏逆变器对称短路电流特性及等效模型研究[J].电气传动,2016,46(9):16-20,43.
Zhang Minglu, Liu Haitao, Wang Xinbao. Research on the characteristics of symmetrical short-circuit current and equivalent model for the photovoltaic inverter[J]. Electric Drive, 2016, 46(9): 16-20, 43.
- [5] 陈彦翔,黄景光,丁婧.微电网自适应电流保护原理完善及其新算法研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(22):22-27.
Chen Yanxiang, Huang Jingguang, Ding Jing. Improvement of micro grid adaptive current protection principle and research on its new algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 22-27.
- [6] 邓超平,唐志军,张曦,等.一种新型的微网自适应过流保护方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(4):38-43.
Deng Chaoping, Tang Zhijun, Zhang Xi, *et al.* A novel adaptive overcurrent protection method for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 38-43.
- [7] 吴在军,赵上林,胡敏强,等.交流微网边方向变化量保护[J].中国电机工程学报,2012,32(25):158-166.
Wu Zaijun, Zhao Shanglin, Hu Minqiang, *et al.* Branch directional variation protection of AC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 158-166.
- [8] 李英量,王德明,王康,等.高渗透率有源配电网的短路电流计算[J].南方电网技术,2021,15(7):61-66.
Li Yingliang, Wang Deming, Wang Kang, *et al.* Short-circuit current calculation for distribution network with distributed generators considering high penetration level[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(7): 61-66.
- [9] 朱苑祺,杨明玉,郑灿,等.基于低电压的反时限微网保护方案[J].电测与仪表,2017,54(18):8-14.
Zhu Yuanqi, Yang Mingyu, Zheng Can. A low voltage based inverse timing protection method for microgrid [J]. Electrical Measurement and Instrument, 2017, 54 (18): 8-14.
- [10] 喻斌,林湘宁,李浩,等.考虑分布式电源稳定助增效应的电压修正反时限过电流保护方案[J].中国电机工程学报,2018,(3):716-726.
Yu Kun, Lin Xiangning, Li Hao, *et al.* A voltage correction based inverse-time overcurrent protection scheme considering distributed generation stable infeed effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 716-726.
- [11] Dewadasa M, Ghosh A, Ledwich G, *et al.* Fault isolation in distributed generation connected distribution networks[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2011, 5(10): 1053-1061.
- [12] 黄文焘,邵能灵,杨霞.微网反时限低阻抗保护方案[J].中国电机工程学报,2014,34(1):105-114.
Huang Wentao, Tai Nengling, Yang Xia. Inverse-time low-impedance protection scheme for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 105-114.
- [13] 姜斌,牟龙华,郭文明,等.基于母线测量导纳变化的微电网保护[J].电网技术,2015,39(6):1751-1758.
Jiang Bin, Mu Longhua, Guo Wenming, *et al.* Microgrid protection based on change of measured bus admittance[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1751-1758.
- [14] 王德明.含分布式光伏电源配电网故障分析和保护研究[D].

- 西安:西安石油大学,2021.
- Wang Deming. Research on fault analysis and relay protection on distribution networks with distributed photovoltaic generators [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [15] 国家标准化管理委员会. GB/T19964—2012 光伏发电站接入电力系统技术规定[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- Standardization Administration of China. GB/T19964—2012 Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [16] Streoski L, Stefani I, Bekut D. Novel method for adaptive relay protection in distribution systems with electronically-coupled DERs[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105551.
- [17] IEEE Standards Association. IEEE. C37.112—2018 IEEE standard for inverse-time characteristics equations for overcurrent relays[S]. IEEE, 2018.
- [18] Sharaf H M, Zeineldin H H, El-saadany E. Protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capabilities using communication assisted dual setting directional overcurrent relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9 (1): 143–151.
- [19] 童荣斌,牟龙华,庄伟. 微电网的有限区域集成保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 90–96, 122.
- Tong Rongbin, Mu Longhua, Zhuang Wei. Limited area integrated protection of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 90–96, 122.
- [20] 裴愉涛,马伟,丁冬,等. 提升距离保护抗过渡电阻能力的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 166–176.
- Qiu Yutao, Ma Wei, Ding Dong, *et al.* Overview of research on distance protection against transition resistance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 166–176.
- [21] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京:中国电力出版社, 2017.
- Xu Bingyin. Relay protection and automation of distribution network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- 收稿日期:2021-08-23
修改稿日期:2021-10-15
- =====
- (上接第11页)
- Zhang Yong, Cheng Xiaohua. Research on starting methods for sensorless brushless DC motors[J]. Micromotors, 2013, 46(11): 88–91.
- [53] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- Xia Changliang. BLDC control system[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [54] 陈德靖,侯文,郑浩鑫. 无位置传感器无刷直流电机启动的新方法研究[J]. 电子器件, 2016, 39(2): 407–411.
- Chen Dejing, Hou Wen, Zheng Haoxin. Further study for the sensorless brushless DC motor start method[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39(2): 407–411.
- [55] 马晓涵,邓智泉,王晓琳. 基于定子磁势闭环控制的无刷直流电机空间矢量无位置传感器启动新方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 44–50.
- Ma Xiaohan, Deng Zhiquan, Wang Xiaolin. New sensorless starting method of BLDCM based on SVPWM and stator magnetomotive force control[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(1): 44–50.
- [56] 邓攀登,陈永军,徐璐. 低速电动汽车用无刷直流电机控制系统[J]. 微电机, 2015, 48(3): 67–70, 84.
- Deng Pandeng, Chen Yongjun, Xu Lu. Brushless DC motor control system for low speed electric vehicle[J]. Micromotors, 2015, 48(3): 67–70, 84.
- [57] 史婷娜,吴曙光,方攸同,等. 无位置传感器永磁无刷直流电机的启动控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 111–116.
- Shi Tingna, Wu Shuguang, Fang Youtong, *et al.* A novel method of detecting for rotor position of a sensorless brushless DC motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 111–116.
- [58] 朱敏,刘刚,周新秀,等. MSCMG无刷直流电机改进的If无位置启动方法[J]. 微电机, 2015, 48(1): 37–42.
- Zhu Min, Liu Gang, Zhou Xinxiu, *et al.* An improved If starting method of sensorless BLDCM for MSCMG[J]. Micromotors, 2015, 48(1): 37–42.
- 收稿日期:2021-06-05
修改稿日期:2021-09-01