

新型微电网外部短路故障保护方案

童荣斌, 牟龙华, 庄伟

(同济大学电气工程系, 上海 201804)

摘要: 结合微电网与配电网的隔离策略, 提出了一种基于正序故障分量原理的新型微电网外部短路故障保护方案。该原理分别提取微电网与配电网之间的联络线两端的正序故障分量进行阻抗计算, 然后利用阻抗角构成的新判据确定是否发生微电网外部故障。该原理无需考虑负荷电流和故障电阻的影响, 克服了微电网故障时短路故障电流小以及潮流双向流动的问题。同时采用正序故障分量电流幅值差动保护作为阻抗角保护判据的启动判据, 构成了一套完整有效的微电网外部短路故障保护方案。用 PSCAD/EMTDC 建立一个连接配电网的微电网仿真模型, 进行各种短路故障仿真, 仿真结果验证了所述保护方案的正确性和有效性。

关键词: 微电网; 隔离策略; 外部故障; 正序故障分量

New protection scheme for external short-circuit fault of microgrid

TONG Rong-bin, MU Long-hua, ZHUANG Wei

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Considering the isolation strategy of microgrid and utility power, the paper proposes a new protection scheme for external short-circuit fault of microgrid based on positive-sequence fault component principle. The principle extracts the positive-sequence fault components of two terminals of tieline between microgrid and utility power and calculates their impedances, then uses the impedance angle as new fault criterion to identify the external fault of microgrid. Without considering the load current and fault resistance, the principle overcomes the bidirectional characteristic and finiteness of short-circuit current. Meanwhile, the current magnitude of positive-sequence fault components is used as trigger criterion, thus the comprehensive protection scheme is presented. A microgrid model connected to utility power is built by PSCAD/EMTDC, and all kinds of fault type are simulated, the simulation result shows that the protection scheme is correct and effective.

Key words: microgrid; isolation strategy; external short-circuit fault; positive-sequence fault component

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0078-07

0 引言

分布式发电作为一种新兴、高效和环保的发电技术得到了飞速的发展, 相当数量且不同类型的分布式电源和相应负荷形成微网并连接到配电网, 与大电网互为补充, 是分布式电源最有效的利用途径^[1-3]。但是, 随着微电网渗透率的不断增加, 传统配电网由单端电源辐射状的网络结构变成了多端电源环状的网络结构, 同时, 由于微电网的控制原理和保护技术十分复杂, 正常运行时, 电网内部潮流双向流动, 短路时基于电力电子装置的故障电流仅接近 2 倍的负荷电流^[4-5]。这些变化对传统继电保护的时限配合、保护性能将产生不利影响, 甚至发生

拒动、误动等严重后果, 直接威胁到配电网的安全稳定运行。

目前, 国内外对微电网继电保护方面的研究已经取得了一定的成果^[6-10], 然而这些成果主要集中在对微电网内部故障的保护研究, 对于结合微电网隔离策略的外部故障保护研究则十分匮乏。近年来, 利用正序故障分量的保护原理逐渐成为继电保护领域的研究热点, 正序故障分量存在于各种故障之中, 充分利用这种故障特征能够确定线路发生的各种故障^[11-13]。基于这两点, 本文在详细阐述微电网隔离策略的基础上, 提出一种基于正序故障分量原理的新型微电网外部短路故障保护方案。

1 微电网的隔离策略分析

在微电网并网运行的系统中, 如果有故障发生, 则首先要确定故障点的位置。如图 1 所示, 故障位

基金项目: 上海市科学技术委员会资助 (12ZR1451300); 上海市教育委员会科研创新项目 (11CX12)

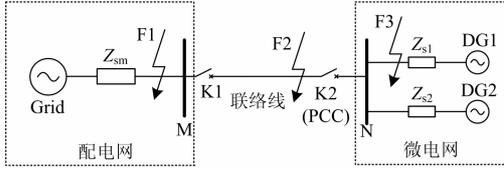


图 1 微电网的并网结构

Fig. 1 Grid-connecting structure of microgrid

置可能位于配电网侧, 联络线上或者微电网内部等三种不同情况。由于仅仅根据公共耦合节点 (PCC) 处的电压和频率的偏移及其持续的时间, 并不能准确判断出故障位置, 因此, 本文提出了基于正序故障分量阻抗角的判据来实现故障区域的定位。

在确定故障位置后, 对于不同位置的故障, 微电网究竟应该作故障穿越运行还是孤岛运行, 从目前的文献来看, 还没有明确的隔离策略。IEEE 1547 标准规定了分布式电源并网时应对各种故障的退出条件, 但是分布式电源以微电网的形式并网后, 情况出现了很大差异。文献[14]指出了三种典型的隔离策略。

(1) 无论故障发生在任何位置, 微电网马上解列, 作孤岛运行。

(2) 无论故障发生在任何位置, 微电网始终与配电网连接, 作故障穿越运行。

(3) 当故障发生在配电网侧与联络线(即微网外部故障)时, 微电网马上解列, 作孤岛运行; 当故障发生在微电网内部时, 微电网继续连接配电网, 作故障穿越运行。

从微电网与配电网的功率交换量、微网内部故障时的短路电流容量以及分布式电源的利用率等几方面分析, 对于一般功率在 10 MW 以下的微电网单元, 本文采用第三种微电网隔离策略, 即如图 1 所示, 当微电网 F1 处和 F2 处发生故障时, 微电网马上解列, 作孤岛运行, 以避免对微电网内部的分布式电源造成损坏; 当微电网 F3 处发生故障时, 微电网持续连接配电网, 作故障穿越运行, 内部故障时配电网能够向微电网提供足够大的短路电流, 使微电网内部保护准确动作。

2 基于正序故障分量阻抗相角的新判据

2.1 正序故障分量阻抗的概念

图 2 为 F1、F2、F3 处故障时的正序故障附加网络图。图中, Z_{sm1} 、 Z_{sn1} 分别为联络线两端的系统等效阻抗, Z_l 为联络线等效阻抗, \dot{U}_F 为故障点处的正序故障分量电势, R_F 为故障点过渡电阻, $\Delta\dot{U}_{mg1}$ 、

$\Delta\dot{U}_{ng1}$ 分别为母线 M、N 处的正序故障分量电压, $\Delta\dot{I}_{mg1}$ 、 $\Delta\dot{I}_{ng1}$ 分别为母线 M、N 处的正序故障分量电流, 分别定义两个正序故障分量阻抗为

$$Z_{M1} = \frac{\Delta\dot{U}_{mg1}}{\Delta\dot{I}_{mg1}} \quad (1)$$

$$Z_{MN1} = \frac{\Delta\dot{U}_{mg1}}{\Delta\dot{I}_{mg1}} + \frac{\Delta\dot{U}_{ng1}}{\Delta\dot{I}_{ng1}} \quad (2)$$

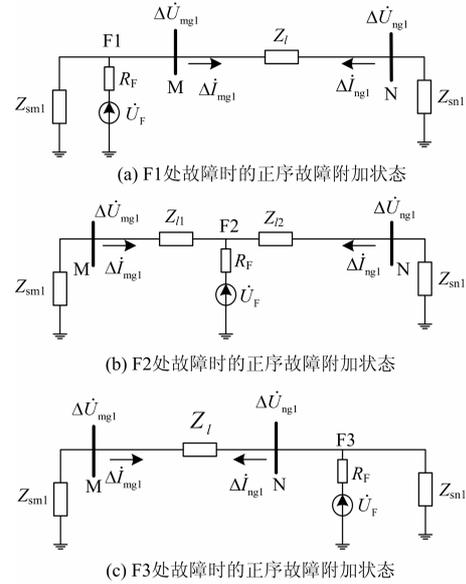


图 2 微电网内外部正序故障附加状态网络

Fig. 2 Internal and external fault network

2.2 微电网内外部故障时的正序故障分量阻抗角分析

当配电网侧 F1 处发生故障时, 如图 2(a)所示, 各正序故障分量阻抗和阻抗角分别为

$$Z_{M1} = \frac{\Delta\dot{U}_{mg1}}{\Delta\dot{I}_{mg1}} = Z_l + Z_{sn1} \quad (3)$$

$$Z_{MN1} = \frac{\Delta\dot{U}_{mg1}}{\Delta\dot{I}_{mg1}} + \frac{\Delta\dot{U}_{ng1}}{\Delta\dot{I}_{ng1}} = Z_l + Z_{sn1} + (-Z_{sn1}) = Z_l \quad (4)$$

$$0^\circ < \arg(Z_{M1}) = \arg(Z_l + Z_{sn1}) < 90^\circ \quad (5)$$

$$0^\circ < \arg(Z_{MN1}) = \arg(Z_l) < 90^\circ \quad (6)$$

当联络线 F2 处发生故障时, 如图 2(b)所示, 各正序故障分量阻抗和阻抗角分别为

$$Z_{M1} = \frac{\Delta\dot{U}_{mg1}}{\Delta\dot{I}_{mg1}} = -Z_{sm1} \quad (7)$$

$$Z_{MN1} = \frac{\Delta\dot{U}_{mg1}}{\Delta\dot{I}_{mg1}} + \frac{\Delta\dot{U}_{ng1}}{\Delta\dot{I}_{ng1}} = -(Z_{sm1} + Z_{sn1}) \quad (8)$$

因 $\arg(Z_{M1}) = \arg(-Z_{sm1}) = 180^\circ + \arg(Z_{sm1})$, 故

$$180^\circ < \arg(Z_{M1}) < 270^\circ \quad (9)$$

同样地 $180^\circ < \arg(Z_{MN1}) < 270^\circ \quad (10)$

微网内部 F3 处发生故障时, 如图 2(c)所示, 各正序故障分量阻抗和阻抗角分别为

$$Z_{M1} = \frac{\Delta \dot{U}_{mg1}}{\Delta \dot{I}_{mg1}} = -Z_{sm1} \quad (11)$$

$$Z_{MN1} = \frac{\Delta \dot{U}_{mg1}}{\Delta \dot{I}_{mg1}} + \frac{\Delta \dot{U}_{ng1}}{\Delta \dot{I}_{ng1}} = -Z_{sm1} + (Z_l + Z_{sm1}) = Z_l \quad (12)$$

$$180^\circ < \arg(Z_{M1}) < 270^\circ \quad (13)$$

$$0^\circ < \arg(Z_{MN1}) < 90^\circ \quad (14)$$

将不同点故障时的正序故障分量阻抗汇总在一起, 结果如表 1 所示。

表 1 微电网故障时的各正序故障分量阻抗

Table 1 Positive-sequence fault component impedance

故障位置	F1 故障	F2 故障	F3 故障
Z_{M1}	$Z_l + Z_{sm1}$	$-Z_{sm1}$	$-Z_{sm1}$
Z_{MN1}	Z_l	$-(Z_{sm1} + Z_{sn1})$	Z_l

2.3 基于正序故障分量阻抗角的微网外部故障保护判据

令 $\varphi_{d1} = \arg(Z_{M1})$, $\varphi_{d2} = \arg(Z_{MN1})$, 根据上述分析可得表 2 结果。

表 2 微电网故障时的各正序故障分量阻抗角

Table 2 Positive-sequence fault component impedance angle

故障位置	F1 故障	F2 故障	F3 故障
φ_{d1}	$(0^\circ, 90^\circ)$	$(180^\circ, 270^\circ)$	$(180^\circ, 270^\circ)$
φ_{d2}	$(0^\circ, 90^\circ)$	$(180^\circ, 270^\circ)$	$(0^\circ, 90^\circ)$

由表 2 分析可知, 当配电网侧发生短路故障时, 计算所得的正序故障分量阻抗 Z_{M1} 的阻抗角 φ_{d1} 取值范围是 $(0^\circ, 90^\circ)$, 而联络线和微电网内部发生短路故障时 Z_{M1} 的阻抗角取值范围是 $(180^\circ, 270^\circ)$, 所以可以通过计算 Z_{M1} 的阻抗角 φ_{d1} 确定配电网侧的短路故障。

同理, 当联络线发生短路故障时 Z_{MN1} 的阻抗角取值范围是 $(180^\circ, 270^\circ)$, 而联络线外部发生故障时 Z_{MN1} 的阻抗角取值范围是 $(0^\circ, 90^\circ)$, 所以可以通过计算 Z_{MN1} 的阻抗角 φ_{d2} 确定联络线的短路故障。

综上所述, 判断微电网的外部短路故障可以简化描述为以下判据

判据 1 $0^\circ < \varphi_{d1} < 90^\circ \quad (15)$

判据 2 $180^\circ < \varphi_{d2} < 270^\circ \quad (16)$

判据 1 和判据 2 为或的关系, 因此, 可以通过分别计算 Z_{M1} 、 Z_{MN1} 的阻抗角判断微电网的外部短路故障。

3 基于正序故障分量电流幅值的判据

基于正序故障分量阻抗角的判据原理引入了电压量和电流量, 这势必会受到互感器断线以及电流幅值大小的影响, 为此引入正序故障分量电流幅值作为启动判据, 防止保护误动作。

配电网侧故障时, 为了确保正序故障分量阻抗角判据能准确判断, 可取 M 侧正序故障电流分量幅值作为其补充判据, 只需要躲过由电流互感器测量到的不平衡电流即可, 令 $\Delta \dot{I}_{qd1} = |\Delta \dot{I}_{mg1}|$, 则得到启动判据 1

$$\Delta I_{qd1} > I_{mg0} \quad (17)$$

式中, I_{mg0} 为电流互感器误差和分布电容产生的不平衡电流, 根据 M 侧线路可能出现的最大分布电容电流整定。

联络线采用正序故障分量电流幅值差动原理作为启动判据。区外故障时, 受到电流互感器测量误差等因素的影响, 两端正序故障分量幅值可能不相等, 产生不平衡电流。但是, 当联络线上故障时, 两端的正序故障分量电流幅值差将远大于不平衡电流, 可以据此判断联络线区内故障。其判据为

$$\left| |\Delta \dot{I}_{mg1}| - |\Delta \dot{I}_{ng1}| \right| > I_{gunb} \quad (18)$$

式中: $\left| |\Delta \dot{I}_{mg1}| - |\Delta \dot{I}_{ng1}| \right|$ 为判据的动作用量; I_{gunb} 为电流互感器和线路分布电容产生的不平衡正序故障分量电流幅值, I_{gunb} 可以由式(19)得到^[15]。

$$I_{gunb} = k(|\Delta \dot{I}_{ng1}| + |\Delta \dot{I}_{mg1}|) + I_{g0} \quad (19)$$

其中: k 为不平衡系数, 作为该判据的制动系数; I_{g0} 为最小正序故障分量动作电流整定值, 根据被保护线路可能出现的最大分布电容电流整定; 按照电流互感器测量误差的 10% 考虑, k 可取 0.1~0.2。令

$$\Delta I_{qd2} = \left| |\Delta \dot{I}_{mg1}| - |\Delta \dot{I}_{ng1}| \right|, \text{ 则可得到启动判据 2}$$

$$\Delta I_{qd2} > I_{gunb} \quad (20)$$

式(17)、式(20)分别作为式(15)、式(16)的启动判据, 能够防止仅基于正序故障分量阻抗角判据带来的误判可能性, 提高了微网外部短路故障保护动作的准确性。

4 基于正序故障分量电流幅值与正序故障分量阻抗角的保护方案

正序故障分量阻抗角保护判据和正序故障分量电流幅值保护判据,二者均存在于各种短路故障中,能够识别各种微电网外部短路故障。前者对系统中各种故障判断都有较高灵敏度和选择性,但是易受系统波动影响;后者通过整定值的选取,能够防止前者的误判,是前者的有益补充。

基于正序故障分量电流幅值判据、正序故障分量阻抗角判据的微电网外部短路故障保护方案实现流程如图3所示。将正序故障分量电流幅值判据作为启动元件,仅当正序故障分量电流幅值大于设定的阈值时,才进行相应的判据计算。该启动元件在系统故障时可靠启动,以此躲避系统振荡的影响。该方案中利用正序故障分量阻抗 Z_{M1} 、 Z_{MN1} 的阻抗角判据同时进行故障判断,其判断结果以或的方式出口跳闸。如果条件不成立则阻抗角判据被闭锁,系统继续采集数据进行判断。

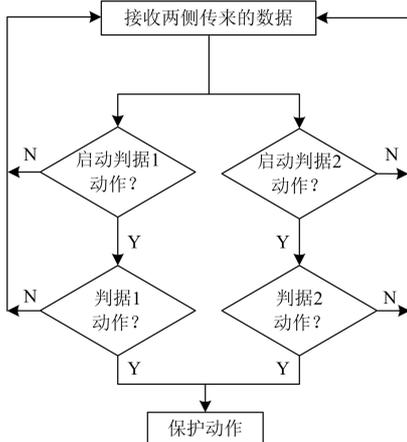


图3 微电网外部短路故障保护方案流程

Fig. 3 Comprehensive protection scheme for external short-circuit fault of microgrid

5 仿真验证及结果

5.1 仿真系统及其参数

根据 IEEE 1547 标准对微电网的详细规定以及美国可靠性技术解决方案联合会 (CERTS) 对微电网的定义,建立了如图4所示 400 V 微电网与低压配电网连接的仿真系统模型,利用电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行仿真分析。

模型中各参数的设置如下。

a. 系统参数

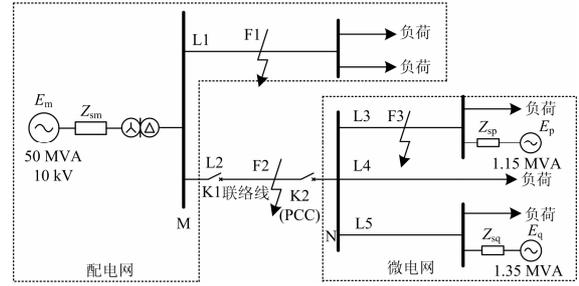


图4 连接配电网的微电网仿真模型

Fig. 4 Grid-connecting microgrid simulation model

$$\begin{aligned} z_{sm1} &= (1.051 + j43.196) \Omega, \quad z_{sm0} = (j29.095) \Omega; \\ z_{sp1} &= (0.5485 + j9.182) \Omega, \quad z_{sp0} = (j9.3576) \Omega; \\ z_{sq1} &= (0.6583 + j12.638) \Omega, \quad z_{sq0} = (j11.3682) \Omega. \end{aligned}$$

b) 线路参数 (阻抗, Ω/km)

$$z_1 = 0.641 + j0.101;$$

$$z_0 = 0.629 + j0.482.$$

c) 各段线路长度: $L_1=500 \text{ m}$, $L_2=1000 \text{ m}$, $L_3=200 \text{ m}$, $L_4=200 \text{ m}$, $L_5=500 \text{ m}$ 。

F1、F2 为微电网外部故障点, F3 为微电网内部故障点。用 PSCAD/EMTDC 仿真软件仿真单相接地短路、两相短路、两相接地短路以及三相短路等四种故障类型,并将仿真得到的数据用 Matlab 软件进行处理。因篇幅所限,下面仅给出 A 相接地故障时联络线两端的正序故障分量电压和电流波形,仿真结果如图5~图10所示,以及在各种故障类型下利用 Matlab 进行处理得到的数据表格。

5.2 仿真结果

结合本模型参数,根据文献[14]可取启动判据1的最大不平衡电流 $I_{mg0}=5 \text{ A}$ 。根据式(19),可取启动判据2的最大不平衡电流 $I_{gunb}=10 \text{ A}$ 。

图5~图10利用 Matlab 进行数据处理,同时对四种短路故障类型进行仿真,结合各判据,汇总在一起,结果如表3所示。

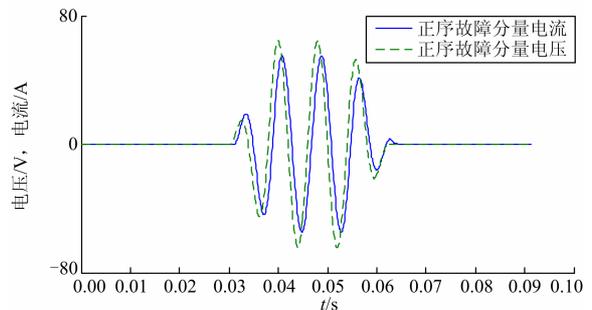


图5 F1故障时M侧的正序故障分量电压、电流
Fig. 5 Positive-sequence fault voltage and current at M side on fault point F1

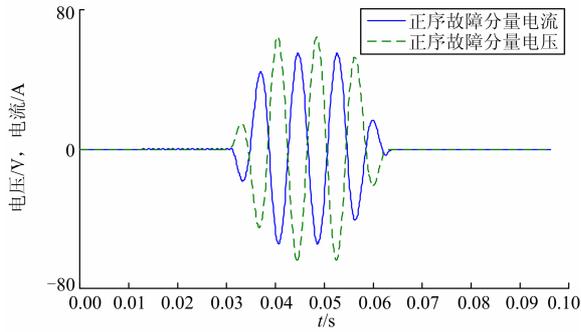


图 6 F1 故障时 N 侧的正序故障分量电压、电流
Fig. 6 Positive-sequence fault voltage and current at N side on fault point F1

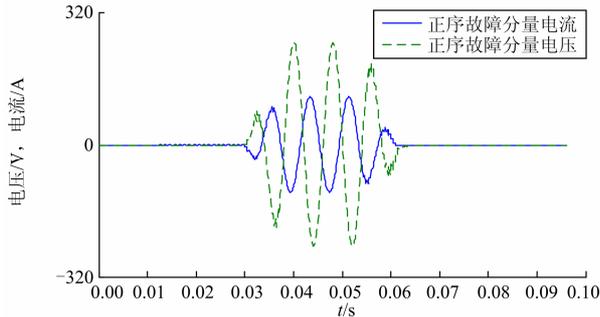


图 7 F2 故障时 M 侧的正序故障分量电压、电流
Fig. 7 Positive-sequence fault voltage and current at M side on fault point F2

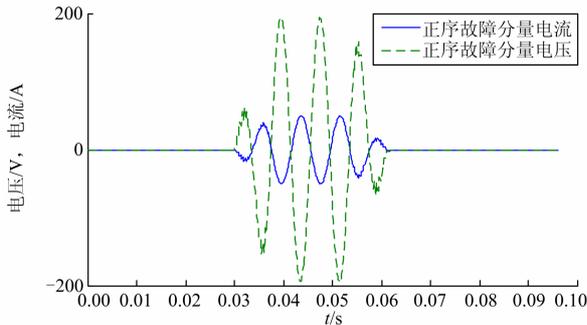


图 8 F2 故障时 N 侧的正序故障分量电压、电流
Fig. 8 Positive-sequence fault voltage and current at N side on fault point F2

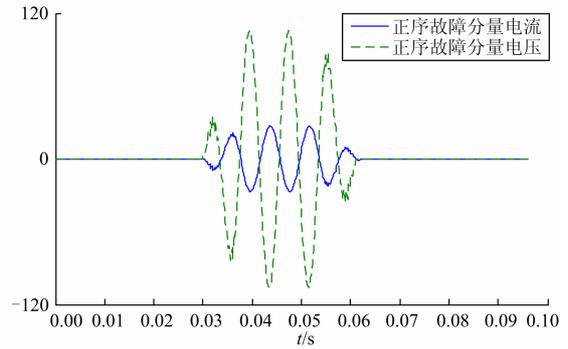


图 9 F3 故障时 M 侧的正序故障分量电压、电流
Fig. 9 Positive-sequence fault voltage and current at M side on fault point F3

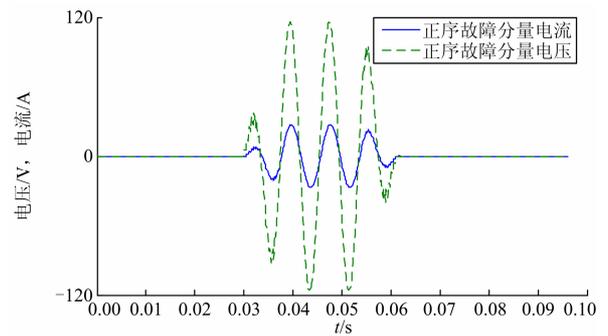


图 10 F3 故障时 N 侧的正序故障分量电压、电流
Fig. 10 Positive-sequence fault voltage and current at N side on fault point F3

5.3 仿真结果分析

(1) 图 5、图 6 分别为 F1 处发生单相接地故障时 M 端、N 端的正序故障分量电压电流，对比两图可知，两端正序故障分量电压基本相同，正序故障分量电流幅值相等，方向相反。

(2) 图 7、图 8 分别为 F2 处发生单相接地故障时 M 端、N 端的正序故障分量电压电流，对比两图可知，两端正序故障分量电压和电流基本不同，

表 3 各种故障下的正序故障分量电流幅值及阻抗角

Table 3 Positive-sequence fault component current magnitude and impedance angle in different fault types

故障类型	故障位置	$\Delta I_{qd1} / A$	$\varphi_{d2} / (^\circ)$	判据 1 生效	$\Delta I_{qd2} / A$	$\varphi_{d2} / (^\circ)$	判据 2 生效	外部故障保护判据生效
AG	F1	33.234	27	√	0	52	×	√
	F2	55.864	221	×	28.623	239	√	√
	F3	23.213	212	×	0	36	×	×
BC	F1	45.422	22	√	0	46	×	√
	F2	68.811	218	×	37.483	226	√	√
	F3	34.889	223	×	0	38	×	×
BCG	F1	52.472	32	√	0	47	×	√
	F2	53.441	242	×	26.312	233	√	√
	F3	34.255	215	×	0	44	×	×
ABC	F1	40.951	29	√	0	59	×	√
	F2	45.840	235	×	35.039	219	√	√
	F3	69.810	232	×	0	44	×	×

没有对应关系。

(3) 图 9、图 10 分别为 F3 处发生单相接地故障时 M 端、N 端的正序故障分量电压电流, 对比两图可知, 两端正序故障分量电压基本相同, 正序故障分量电流幅值相等, 方向相反。

(4) 表 3 是将 PSCAD/EMTDC 仿真得到的各种故障类型下 M 端、N 端的正序故障分量电压、电流用 Matlab 进行数据处理得到的正序故障分量电流幅值和阻抗角。根据本文所提出的判据, 显然能够对各种故障作出反应并确定微电网的内外部故障区域, 有效判断外部短路故障。

6 结论

结合微电网的隔离策略来实现微电网外部的保护是微电网保护研究不可或缺的一部分, 本文引入正序故障分量原理, 提出了一种基于正序故障分量电流幅值和正序故障分量阻抗角的新型微电网外部短路故障保护方案。首先用 PSCAD/EMTDC 对连接配电网的微电网不同故障位置进行仿真, 然后将仿真数据用 Matlab 进行处理。仿真结果表明, 根据本文所提出的判据能够有效地判断微电网外部的各种短路故障, 所提出的保护方案具有很好的理论意义和实用价值。

参考文献

- [1] 张宗包, 袁荣湘, 赵数华, 等. 微电网继电保护方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 204-208.
ZHANG Zong-bao, YUAN Rong-xiang, ZHAO Shu-hua, et al. Research on microgrid protection—a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 204-208.
- [2] 王成山, 肖朝霞, 王守相, 等. 微电网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
WANG Cheng-shan, XIAO Chao-xia, WANG Shou-xiang, et al. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.
- [3] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微电网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
HUANG Wei, SUN Chang-hui, WU Zi-ping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18.
- [4] 陈昌松, 段善旭, 殷进军, 等. 基于发电预测的分布式发电能量管理系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 150-156.
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, YIN Jin-jun, et al. Energy management system of distributed generation based on power forecasting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 150-156.
- [5] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-238.
SU Ling, ZHANG Jian-hua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-238.
- [6] 陆建, 牟龙华. 实用化的微网单相接地短路故障识别[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 11-16.
LU Jian, MU Long-hua. A practical identification for single-phase ground fault of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 11-16.
- [7] 王晓寰, 张纯江. 分布式发电系统无缝切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 217-222.
WANG Xiao-huan, ZHANG Chun-jiang. Study of control strategy for seamless transfer of grid-connected distributed generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 217-222.
- [8] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Microgrid fault protection based on symmetrical and differential current components[C] // Public Interest Energy Research California Energy Commission, California, USA: 2006.
- [9] 牟龙华, 陆建, 张鑫. 闭环微网快速接地保护实用化方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 39-44.
MU Long-hua, LU Jian, ZHANG Xin. A practical and fast ground-fault protection scheme for closed-loop microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 39-44.
- [10] AI-NASSERI H, REDFERN M A, LI F. A voltage based protection for micro-grids containing power electronic

- converters[C] // Power Engineering Society General Meeting, California, USA: 2006.
- [11] 葛耀中. 新型继电保护故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- GE Yao-zhong. New relay protection principle and technology of fault location[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [12] 刘凯, 李小滨, 索南加乐, 等. 基于故障分量正序阻抗的方向元件[J]. 电力系统自动化, 2009, 35(12): 67-71.
- LIU Kai, LI Xiao-bin, SUONAN Jia-le, et al. Direction element based on fault component positive sequence reactance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 35(12): 67-71.
- [13] 许庆强, 索南加乐, 李瑞生, 等. 正序故障分量方向元件误动的原因分析及其对策[J]. 继电器, 2005, 33(9): 12-16.
- XU Qing-qiang, SUONAN Jia-le, LI Rui-sheng, et al. Maloperation analysis of positive sequence fault components based direction relay and its countermeasure[J]. Relay, 2005, 33(9): 12-16.
- [14] 梁明辉. 微网故障特征分析和保护原理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- LIANG Ming-hui. The microgrid fault characteristic analysis and the study on protection principle[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [15] 索南加乐, 张泽宁, 粟小华, 等. 基于故障分量的分相阻抗差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 41-46.
- SUONAN Jia-le, ZHANG Ze-ning, SU Xiao-hua, et al. Novel principle investigation of segregated phase impedance differential protection based on fault components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 41-46.

收稿日期: 2013-07-27; 修回日期: 2013-12-04

作者简介:

童荣斌(1989-), 男, 硕士研究生, 现主要研究方向为微电网保护与控制; E-mail: tongrongbin@163.com

牟龙华(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统微机保护与电能质量;

庄伟(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统微机保护。