

一种采用注入信号的配电网单相接地故障判别方法

郭明奇 张占营 景广华 王 涛 张 亮
(国网河南省电力有限公司安阳供电公司)

摘要：配电网因直面用电客户，导致存在网架复杂、设备多样和故障频发问题，其中单相接地故障在配电网故障中占比较大，同时考虑到近年来新能源大量接入电网，配电网由受电转为受电、发电共存，对此本文提出一种采用注入信号的配电网单相接地故障判别方法，通过新能源设备间歇向配电网注入特征信号，利用检测装置分析信号来判断是否存在单相接地故障，并且得出故障相别和范围。文中搭建仿真模型，分析有、无故障和不同相接地时检测信号幅值特点，结果表明，本文所提方法有效。

关键词：配电网；单相接地故障；逆变器；注入特征信号

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”规划的提出，电力在国民经济生产中发挥越来越重要的作用，配电网作为电力输送的末端，直接与各种用户连接，导致配电网规模随需求变得愈发庞大复杂，发生接地故障时会导致停电，轻则影响用户用电，重则产生严重经济损失和社会影响。据统计，在配电网的所有接地故障中，单相接地故障占比高达80%^[1]。因此，判断是否存在单相接地故障，发生故障时快速确定相别有助于消除故障。

目前主流的配电网单相接地故障判别方法分为稳态判别和暂态判别两种，稳态判别方法有基于零序电流幅值相位比方法、零序电流谐波分析法^[2-3]等，但是存在特征信号能量小、不稳定、不易辨识等问题；暂态判别方法有神经网络智能算法判别、小波变换判别、行波^[4-5]等方法，但是存在实施复杂、接地故障

判断成本高的问题。

相比于稳态判别和暂态判别的被动式判别方法，特征信号注入的主动式接地故障判别方法能解决信号能量小、不易辨识的问题，并且借助配电网中存在的分布式新能源逆变器作为电源点，可以很好地克服判断成本高的问题。

1 配电网单相故障模型

配电网接地对整体配电网的安全运行具有重大意义，根据接地措施不同，可分为中性点直接接地或者中性点串接低阻值电阻接地、中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点经电阻接地，这四种配电网中性点接地方式各有优缺点，我国配电网从自身状况考虑，主要是经消弧线圈接地方式，所以以其为例分析，具体见图1。

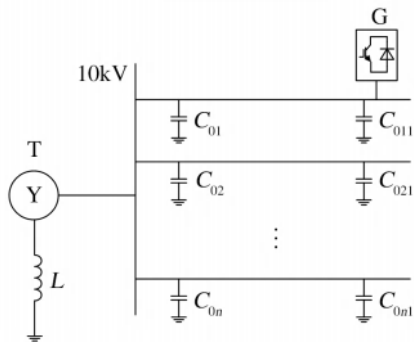


图1 消弧线圈接地的配电网系统示意图

图中T为110kV变10kV的变压器，其低压侧经消弧线圈接地， C_{01} 、 C_{011} 等为配电网线路寄生电容，G为接入配电网的新能源逆变器。

配电网中接入的新能源逆变器大多是不带变压器的非隔离型，如图2所示。逆变器主电路由6个IGBT组成，受开断信号控制，IGBT按照一定规律导通，同时IGBT器件中有寄生的反向二极管 VD_i ，所以完全能够满足续流要求。IGBT的开断控制信号由调制波 u_r 和载波 u_c 调制获得，具体是调制波大于载波时开通，小于载波时关断，具体如图3所示。

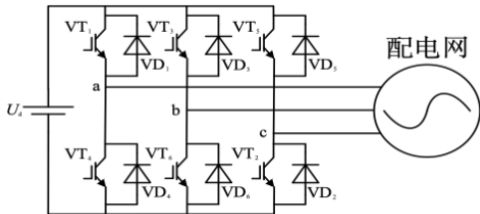


图2 非隔离新能源并网逆变器示意图

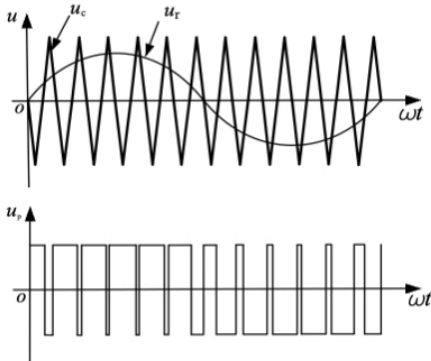


图3 调制波调制载波原理示意图

通过改进优化调制波，逆变器可以向所连接的配电网注入设定的特征信号，同时正常状态的配电网三相均衡，所检测的特征值也是基本一致的。但是加入配电网存在单相接地故障，此时可通过检测特征值的差异性判别单相接地故障。

2 逆变器注入信号控制策略

根据调制原理^[6]，尤其是对非隔离型逆变器来说，调制波中加入何种信号，逆变器出口侧电压频谱中即表现出相应信号及其 N 倍频信号，如式(1)和式(2)所示，同时 N 倍频信号的幅值大幅减小，并且考虑逆变器出口侧的低通滤波器，所以可以认为调制波中加入何种信号，逆变器出口侧即表现何种信号。频谱分析如图4所示。

$$U_{m(n)} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} E \sin n\omega t \cdot d(\omega t) \quad (1)$$
$$= \frac{4E}{n\pi} [1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i \cdot \cos n\alpha_i]$$

$$U_{m(1)} = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^m (-1)^{i+1} \cdot \cos n\alpha_i \quad (2)$$

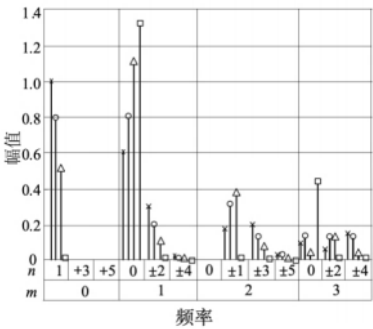


图4 频谱分析图

由于逆变器主要用于并网发电，因此调制波主要成分是电网的50Hz基波信号，同时为判别配电网单相接地故障，还需叠加特征信号。为不影响逆变器并网发电的电能质量，一般采取注入频率为基波 m 倍的特征信号，正常情况下特征信号经逆变器出口，流经配电网线路、线路对地寄生电容、配电网中性点接地消

弧线圈，在故障情况下还会流经故障点接地电阻。在 m 倍基波频率特征信号下消弧线圈感抗、配电网线路对地寄生电容容抗和故障情况下接地电阻分别表现为：

$$\omega = m \times 2\pi f_0 \quad (3)$$

$$Z_L = \omega L \quad (4)$$

$$Z_C = \frac{1}{\omega C} \quad (5)$$

$$Z_R = R \quad (6)$$

式中， m 为正整数； f_0 为电网基波频率； L 为消弧线圈等效电感值； C 为对地寄生电容值； R 为接地电阻值。

由式 (4) ~ 式 (6) 可知，选取特征信号频率越高，中性点接地处消弧线圈的感抗越大，对地寄生电容容抗越小，特征信号集中在线路对地寄生电容上，此时靠近中性点的单相接地故障点不易分析得出。反之选取特征信号频率越低，中性点接地处消弧线圈的感抗越小，对地寄生电容容抗越大，特征信号集中在消弧线圈上，此时远离中性点的单相接地故障点不易分析出。

3 判别方法

根据上述分析，本文选取两个 m ，分别为 5 和 11 倍，5 倍基波频率的特征信号用于判别靠近中性点的配电网单相接地故障，11 倍基波频率的特征信号用于判别远离中性点的配电网单相接地故障。

采取的注入方法是，连接配电网的逆变器，以 T 为周期，进行特征信号的注入，单次注入特征信号时长为 ΔT ，利用逆变器出口侧电能质量检测装置和配电网中安装的信号检测装置检测相应信号，如所有相别幅值相位一致，则当前无单相接地故障。如存在某一相别幅值或相位与其他相不一致，且存在较大差异，则说明配电网在该相别存在接地故障，同时根据 5 倍频和 11 倍频特征信号检测差异大小可以估算出故障点范围。

障点范围。

4 仿真分析

利用配电网标准 IEEE 节点模型，并考虑 10kV 配电网典型线路参数^[7]建立仿真模型，本文对有无故障、故障相别判定和故障范围判断三方面进行仿真验证，选取的特征信号为基波 5 倍频和 11 倍频，线路参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 架空线路参数

相序	电阻 (Ω/km)	电容 ($\mu\text{F}/\text{km}$)	电感 (mH/km)
零序	0.275	0.0054	4.6
正序	0.125	0.0096	1.3

表 2 电缆参数

相序	电阻 (Ω/km)	电容 ($\mu\text{F}/\text{km}$)	电感 (mH/km)
零序	2.7	0.28	1.019
正序	0.27	0.339	0.255

4.1 无接地故障时仿真结果

从仿真结果可知，无接地故障时 A、B、C 三相的特征信号检测值基本一致，所有相别状况相同，可以判断出此时配电网无接地故障，如图 5 所示。

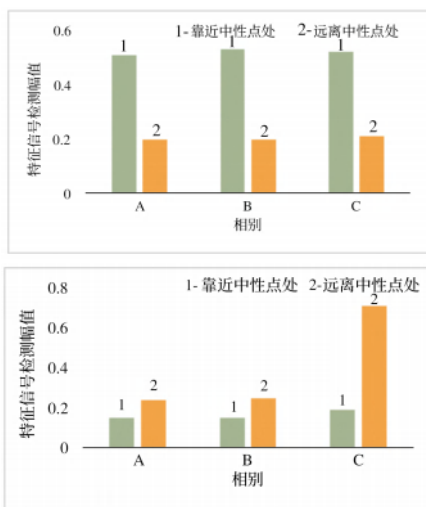


图 5 无接地故障时，5 倍和 11 倍频特征信号检测幅值

4.2 A 相靠近中性点处接地故障

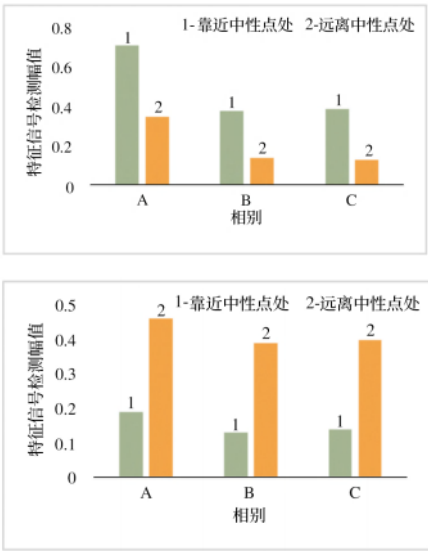


图6 A相接地故障时, 5倍和11倍频特征信号检测幅值

从仿真结果可知, A相接地故障时, A相特征信号检测值相比B、C相显著增大, 并且此时基波5倍频特征信号检测值增大占比超11倍频, 可以判定故障范围靠近中性点位置, 如图6所示。

4.3 C相远离中性点处接地故障

从仿真结果可知, C相接地故障时, C相特征信号检测值相比A、B相显著增大, 并且此时基波11倍频特征信号检测值增大占比超5倍频, 可以判定故障范围远离中性点, 如图7所示。

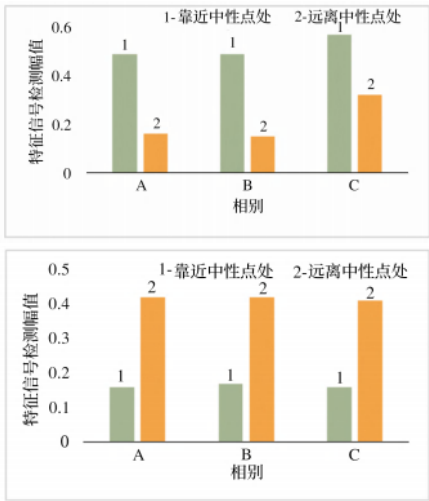


图7 C相接地故障时, 5倍和11倍频特征信号检测幅值

5 结束语

文中提出一种采用注入信号的配电网单相接地故障判别方法, 借助配电网中大量存在的新能源逆变器和检测装置实现, 原理是利用逆变器周期性向配电网注入特征信号, 由于接地故障态和正常态的电网阻抗特性差异, 实现配电网单相接地故障、故障相别及故障点范围的判别, 并通过仿真验证注入信号判别配电网单相接地故障的有效性。

参考文献

[1] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.

[2] 李响. 基于逆变器注入信号的配电网故障选线方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.

[3] 杨汉生, 赵斌, 姚晴林, 等. 基于零序功率的小电流选线方法[J]. 继电器, 2002(11): 30-32.

[4] 杜丁香, 徐玉琴. 消弧线圈接地电网的有功选线[J]. 继电器, 2002(5): 33-36.

[5] 姜博, 董新洲, 施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.

[6] 苏战涛, 吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2004(12): 30-33.

[7] 张兴, 黄海宏. 电力电子技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

[8] Xue Y, Chen X, Song H, et al. Resonance analysis and faulty feeder identification of high-impedance faults in a resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1545-1555.

(收稿日期: 2024-03-20)