

# 适用于逆变型电源接入的故障方向判别新方法

刘 玮<sup>1</sup>, 赖清华<sup>2</sup>, 刘慧媛<sup>3</sup>, 张 哲<sup>2</sup>, 谭涛亮<sup>3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510000; 2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 广东电网有限责任公司阳江供电局, 广东 阳江 529500)

**摘要:** 由于新能源电源馈出的短路故障特性与同步发电机存在较大差异, 当传统方向元件应用于新能源场站的联络线和集电线时, 无法保证其动作的正确性。因此根据逆变型电源馈出的短路电流的特点, 提出一种适用于逆变型电源接入的故障方向判别新方法。该方法利用序电压进行故障类型判断, 在此基础上, 根据正、反方向故障时各序电流比值和电流幅值差异, 进行故障方向辨识。数字仿真结果表明, 该方法在不同故障类型下均能正确判断故障方向, 且受过渡电阻的影响较小, 具有良好的工程应用价值。

**关键词:** 新能源; 逆变型电源; 方向元件; 故障方向; 继电保护; 判据

**中图分类号:** TM 77

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202001005

## 0 引言

随着新能源技术的大力发展和日趋完善, 以光伏电站、风力发电站为代表的新能源厂站已经在电网中得到了大规模的应用<sup>[1-2]</sup>。其中通过逆变器与电网直接互联的光伏电源和直驱风机(统称为逆变型电源)占据着重要地位。当电网发生故障时, 逆变型电源由于采取低电压穿越运行控制策略及限流控制措施等<sup>[3-8]</sup>, 其故障电流特性较传统同步发电机有较大差异, 在某些情况下会使得传统方向元件应用于集电线和联络线保护时无法正确判断故障方向, 进而可能导致保护拒动或误动。

文献[9]结合典型低电压穿越控制策略, 研究了逆变型电源对各类故障分量方向元件的影响机理, 得出正序和负序方向元件不可用, 而零序方向元件可用的结论, 但零序方向元件只能反映不对称接地故障, 且当升压变中性点采用间隙接地方式时, 由于新能源侧无零序电流, 将导致零序方向元件难以应用; 文献[10]根据风电机组等值序阻抗变化特性, 分析了传统方向元件应用于风电接入系统时存在的误判问题, 但未提出改进方法; 文献[11]提出了一种基于正序故障电流和记忆电压比相的方向判别方法, 但记忆电压只能短时使用, 且所提方法主要针对配电网, 适用范围有限。

针对上述问题, 本文从逆变型电源的低电压穿越控制策略和限流措施等出发, 分析了发生正、反方向故障时, 各序电流的变化特点。以此为基础, 提出

了一种综合应用序电流比值比较、正序电流幅值比较以及零序功率方向元件的故障方向判别新方法, 并通过数字仿真, 验证了所提方法的正确性。

## 1 逆变型电源接入对方向元件的影响分析

传统方向元件主要分为相量故障分量方向元件和序故障分量方向元件2类, 其中相量故障分量方向元件本质上由正序故障分量方向元件和负序方向元件组合构成, 其特性与序故障分量方向元件类似。传统方向元件的动作性能主要取决于故障附加等值网络的结构和参数。以图1所示的简单系统为例, 点 $f_1$ 发生故障时, 其各序故障分量等值电路见图2。

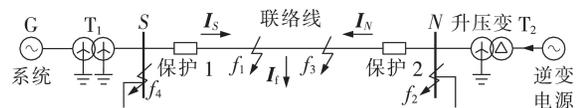


图1 简单电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of simple power grid

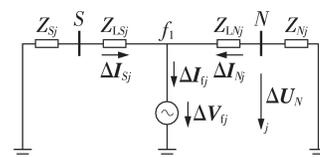


图2 各序故障分量等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of sequential fault component

图中,  $f_1$ — $f_4$ 表示故障位置;  $T_1$ 和 $T_2$ 为变压器; 电流 $I_s$ 和 $I_N$ 的方向为母线流向线路;  $I_f$ 为故障点电流;  $\Delta I_{sj}$ 、 $\Delta I_{nj}$ 和 $\Delta I_{fj}$ 分别为 $I_s$ 、 $I_N$ 、 $I_f$ 的序故障分量;  $\Delta U_{Nj}$ 为电压序故障分量;  $Z_{Lsj}$ 和 $Z_{Lnj}$ 为联络线的等值序阻抗;  $Z_{sj}$ 和 $Z_{nj}$ 分别为母线S和母线N背侧系统的等值序阻抗;  $\Delta V_{fj}$ 为故障点等效附加序电源; 下标j取1、2、0, 分别表征正序、负序和零序。

以序故障分量方向元件为例, 其基本动作判据见式(1)。

收稿日期: 2019-02-16; 修回日期: 2019-11-06

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(031700KK5216-0004); 国家重点研发计划项目(2016YFB0900600)

Project supported by the Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Corporation(031700KK52160004) and the National Key R&D Program of China(2016YFB09-00600)

$$-90^\circ \leq \frac{\Delta U_j e^{-j\phi_{mj}}}{-\Delta I_j} \leq 90^\circ \quad (1)$$

其中,  $\Delta U_j$  和  $\Delta I_j$  为序故障分量;  $\phi_{mj}$  为各序方向元件灵敏角, 若取  $\phi_{mj} = 90^\circ$ , 则动作方程为:

$$0^\circ \leq \frac{\Delta U_j}{-\Delta I_j} \leq 180^\circ \quad (2)$$

由式(2)可知, 当保护背侧系统等值阻抗  $Z_{sj}$  和  $Z_{nj}$  的阻抗角在  $(0^\circ, 180^\circ)$  范围内时, 方向元件可正确判断方向。

对于系统侧,  $Z_{sj}$  为同步发电机供电系统的等值阻抗, 各序阻抗均为恒定的感性阻抗, 故发生正向短路故障时, 序故障分量方向元件能正确判断故障方向; 对于逆变型电源侧  $N$ , 其各序等值阻抗取决于逆变型电源的短路电流特性, 与所采用的低电压穿越控制策略等密切相关, 与同步机电源等值阻抗存在较大差异, 进而将直接影响方向元件的动作性能, 突出表现在以下几个方面。

(1) 正序等值阻抗: 正序等值阻抗  $Z_{N1}$  由升压变压器  $T_2$  和逆变型电源的正序等值阻抗共同组成, 由于箱变的常见电压等级有  $0.69 \text{ kV} / 35 \text{ kV}$ 、 $0.69 \text{ kV} / 10 \text{ kV}$  和  $0.48 \text{ kV} / 10 \text{ kV}$  等, 变比均较大, 逆变型电源经等值后的正序阻抗一般远大于其他各元件的正序阻抗<sup>[10]</sup>, 因此,  $Z_{N1}$  的阻抗特性与逆变型电源等值阻抗相近。当电网发生短路故障时, 逆变型电源将按电压跌落深度向电网提供无功支撑, 同时根据逆变器本体电流限幅要求(一般相电流幅值不大于  $1.2 I_n$ ,  $I_n$  为额定电流), 尽量维持电网有功功率平衡<sup>[12-13]</sup>。研究表明, 逆变型电源的正序等值阻抗的阻抗角受短路前负荷水平、短路电压跌落深度、所发无功功率大小等诸多因素影响<sup>[13-14]</sup>, 其变化范围将超过  $(0^\circ, 180^\circ)$ , 进而可能导致正序故障方向元件误判方向, 造成保护拒动。

(2) 负序等值阻抗: 负序等值阻抗  $Z_{N2}$  的阻抗特性主要取决于逆变型电源在不对称故障下的低电压穿越控制策略。目前, 不对称故障下的典型低电压穿越控制策略主要有2类, 一类是抑制负序电流, 另一类是抑制有功功率或无功功率波动。对于逆变型电源而言, 其与双馈型电源不同, 由于无旋转元件, 故主要采用负序电流抑制策略<sup>[15-19]</sup>, 以降低不对称短路故障对电网的影响。故在不对称故障情况下, 逆变型电源馈出的短路电流主要是正序电流, 负序电流基本为0, 即  $Z_{N2} = \infty$ , 导致负序方向元件因无法正常工作而失效。

(3) 零序等值阻抗: 由图1可知, 当升压变压器  $T_2$  采用  $Y_n / \Delta$  接线方式时,  $N$  侧零序等值阻抗等于  $T_2$  的漏阻抗, 不受逆变型电源阻抗特性的影响。因此, 当发生不对称接地短路故障时, 零序方向元件可

正确判断故障方向。但在工程实际应用中, 为改善电网零序电流保护的性能, 升压变  $T_2$  高压侧常采用间隙接地方式。若间隙不击穿, 新能源侧无零序电流, 将造成零序方向元件无法正常工作。同时, 零序方向元件仅能反映不对称接地故障, 需与其他方向元件共同作用, 以实现对其他类型故障的方向判别。

另外, 需要指出的是, 目前对新能源方向元件的研究中, 一般认为系统侧(S侧)的传统方向元件能正确判断故障方向, 即基本不受新能源短路特性的影响。但若系统侧发生反向故障, 其故障电流仍由逆变型电源提供, 也可能导致系统侧方向元件误判或失效。

综上所述, 当传统方向元件应用于逆变型电源电网时, 若电网发生短路故障, 且方向元件的短路电流主要由逆变型电源提供时, 将造成方向元件无法正确判断故障方向, 进而可能导致保护拒动或误动, 因此, 需要采用新的故障方向判别方法保证电网运行安全。

## 2 适用于逆变型电源接入的故障方向判别新方法

前述分析表明, 导致传统方向元件无法正确动作的主要原因是逆变型电源馈出的短路电流特性与传统同步发电机存在较大差异。下面将以逆变型电源侧(图1中的  $N$  侧)为例, 根据逆变型电源在不同故障情况下短路电流、电压的变化特点, 研究可行的故障方向判别方法。发生不同故障时故障点的复合序网如图3所示。图中,  $V_f^{(0)}$  为短路故障发生前故障点电压;  $Z_{\Sigma 1}$ 、 $Z_{\Sigma 2}$  和  $Z_{\Sigma 0}$  分别正序、负序和零序输入阻抗;  $I_{f(1)}$ 、 $I_{f(2)}$ 、 $I_{f(0)}$  分别为正序、负序和零序电流。

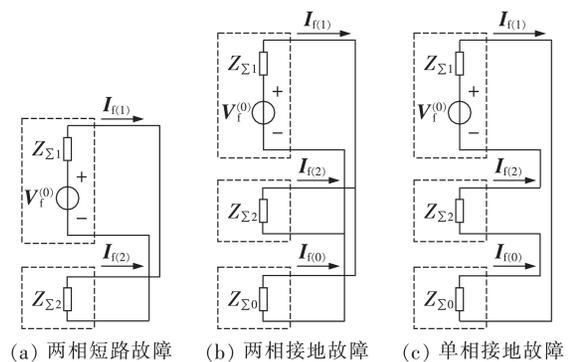


图3 故障点的复合序网

Fig.3 Composite sequence network of fault point

### (1) 两相短路故障。

两相短路故障的基本故障特征为: 存在负序电压但无零序电压; 发生正向短路故障(故障点为  $f_1$ ) 时, 流过方向元件的短路电流由逆变型电源提供。由于逆变型电源采用负序电流抑制措施, 其负序电流基本为0, 远小于正序电流; 而发生反向短路故障

(故障点为 $f_2$ )时,短路电流由系统侧提供,由于系统侧提供的短路电流远大于逆变侧电源馈出的短路电流,因此,故障点短路电流可近似采用传统对称分量法进行分析。根据图3(a)所示的复合序网<sup>[20]</sup>,故障点正序电流与负序电流相同。由于逆变型电源负序回路相当于开路,故方向元件处的测量电流幅值 $I_{N1} \approx I_{N2}$ 。

根据上述故障特性,定义 $k_{21} = I_{N2}/I_{N1}$ ,构建两相接地故障方向元件判据(判据1)。

判据1:若 $(U_{N2} > U_{set2}) \cap (U_{N0} < U_{set0}) \cap (k_{21} < k_{set21})$ ,则判断为正向故障;若 $(U_{N2} > U_{set2}) \cap (U_{N0} < U_{set0}) \cap (k_{21} > k_{set21})$ ,则判断为反向故障。

其中,“ $\cap$ ”表示且; $I_{Nj}$ 和 $U_{Nj}$ 分别为测量的各序电流基频分量 $I_{Nj}$ 和序电压基频分量 $U_{Nj}$ 的幅值( $j=1,2,0$ ); $U_{set2}$ 、 $U_{set0}$ 分别为负序电压和零序电压阈值,可借鉴传统电网的整定方法将其典型值取为2~5 V(二次侧值);由于发生反向故障时序电流比值 $k_{21}$ 较大(近似为1),而发生正向故障时 $k_{21}$ 较小(接近于0)。综合考虑测量误差以及逆变器调节误差的影响,阈值 $k_{set21}$ 可取为0.3。

#### (2)两相接地短路故障。

两相接地短路故障的基本故障特征为:存在零序和负序电压;发生正向短路故障(故障点为 $f_1$ )时,若升压变 $T_2$ 采用中性点直接接地方式,则逆变型电源侧(N侧)存在较大零序电流,可采用零序方向元件判断故障方向;但如前所述,在实际工程应用中,为了改善电网零序电流保护的灵敏度,逆变型电源升压变 $T_2$ 常采用间隙接地方式,此时 $I_{N0} = 0$ ,将导致零序方向元件失效。针对上述问题,当 $T_2$ 采用间隙接地方式时,可借鉴两相短路故障判据的构建思路,通过比较序电流的大小进行方向判断。

当升压变 $T_2$ 经间隙接地时,若发生正向短路故障(故障点为 $f_1$ ),除 $I_{N0} = 0$ 外,逆变型电源提供的负序电流也基本为0(远小于正序电流);而发生反向短路故障时(故障点为 $f_2$ ),短路电流主要由系统侧提供,由图3(b)所示的复合序网可见,此时将存在明显的负序电流和零序电流。对于实际系统,负序电流和零序电流的大小取决于零序和负序阻抗回路的分流,若系统侧零序等值阻抗远小于负序阻抗,将导致发生反向短路故障时负序电流 $I_{N2}$ 偏小,反之,若零序阻抗远大于负序阻抗(如高阻接地故障),则发生反向故障时 $I_{N0}$ 将大幅降低。故仅通过 $I_{N2}$ 与 $I_{N1}$ 的比值,或 $I_{N0}$ 与 $I_{N1}$ 的比值均难以正确区分正、反向故障。注意到发生正向故障时(升压变 $T_2$ 经间隙接地),有 $I_{N0} + I_{N2} \approx 0$ ,而发生反向故障时,有 $I_{N0} + I_{N2} \approx I_{N1}$ ,两者存在明显差异。故可利用 $I_{N0} + I_{N2}$ 与正序电流幅值 $I_{N1}$ 的比值正确判断故障方向。

综上,定义 $k_{201} = (I_{N0} + I_{N2})/I_{N1}$ ,构建两相接地短路

故障方向判据(判据2)。

判据2:若 $(U_{N0} > U_{set0}) \cap (I_{N0} > I_{set0})$ ,则采用零序方向元件,即利用式(1)判断故障方向;若零序电流较小(升压变经间隙接地),则利用 $k_{201}$ 大小判断故障方向,即若 $(U_{N0} > U_{set0}) \cap (I_{N0} < I_{set0}) \cap (k_{201} < k_{set201})$ ,则判断为正向故障;若 $(U_{N0} > U_{set0}) \cap (I_{N0} < I_{set0}) \cap (k_{201} > k_{set201})$ ,则判断为反向故障。其中,阈值 $k_{set201}$ 参考 $k_{set21}$ 的取值依据,取为0.3。

#### (3)单相接地短路故障。

单相接地短路故障的基本故障特征与两相接地短路故障类似。因此,当测量电流中存在较大的零序电流时(升压变 $T_2$ 采用中性点直接接地方式),可直接采用零序方向元件判断故障方向;若零序电流较小(采用间隙接地方式),发生正向短路故障时 $I_{N0} + I_{N2} \approx 0$ ,远小于正序电流;而发生反向短路故障时,短路电流主要由系统侧提供,根据图3(c)所示复合序网可知,此时有 $I_{N0} + I_{N2} \approx 2I_{N1}$ ;故也可通过比较 $I_{N0} + I_{N2}$ 与 $I_{N0}$ 的比值区分正、反向故障。

综上所述,单相接地短路故障可直接采用两相接地短路故障判据(判据2)进行故障方向判断。

#### (4)三相对称短路故障。

三相对称短路故障的基本故障特征是正序电压较低,且无负序和零序电压。当故障点较远时,不难证明无论是正向短路故障还是反向短路故障,均可直接采用正序方向元件(非正序突变量方向元件)正确判断故障方向。但若发生近区三相短路故障,由于正序电压较低,将导致正序方向元件失效,需采用其他判别方法。注意到,正向出口(点 $f_3$ )发生故障时,由于逆变型电源馈出的短路电流受限幅控制,其值较小,而反向出口(点 $f_2$ )短路时,短路电流由系统侧提供,幅值较大,两者存在明显差异,因此可利用短路电流幅值比较构成方向判据,消除出口死区。综上所述,可构建三相短路方向判据(判据3)如下。

若 $(U_{N1} < U_{set1max}) \cap (U_{N0} < U_{set0}) \cap (U_{N2} < U_{set2})$  ( $U_{set1max}$ 为低电压定值,典型值可取为 $0.7U_n$ , $U_n$ 为正常运行时的额定电压),则进入三相短路故障方向判断流程。

a. 如果 $U_{N1} > U_{set1}$ ,则采用式(3)所示的正序方向元件判据判断故障方向。

$$-90^\circ \leq \frac{U_{N1} e^{-j\phi_{m1}}}{-I_{N1}} \leq 90^\circ \quad (3)$$

其中, $U_{set1}$ 可取为 $0.15 \sim 0.2 U_n$ ;  $\phi_{m1}$ 为方向元件灵敏角,典型值可取为 $80^\circ$ 。

b.  $U_{N1} < U_{set1}$ ,则表明发生近区三相短路故障,利用正序电流幅值大小判断故障方向,即:如果 $I_{N1} < I_{set1}$ ,则判断为正向故障;反之为反向故障。其中, $I_{set1}$ 根据逆变型电源电流限幅值确定,假设限幅值为 $1.2 I_n$ ,取1.5倍可靠系数,则 $I_{set1}$ 整定为 $1.8 I_n$ 。

在实际应用中,可由判据1—3构成综合判据,以实现对所有类型故障的方向判断,综合判据流程见附录中的图A1。

对于系统侧方向元件,由于发生反向故障时,其故障电流由逆变型电源提供,传统方向元件也存在误判可能,故其方向元件判据也需进行修改。不难看出,对于系统侧方向元件,其在发生反向短路故障时的电流、电压特性与逆变型电源侧方向元件发生正向故障时相近,而其在正向故障下的电流、电压特性与逆变型电源侧的反向故障下相同。因此,系统侧方向元件判据可直接借用上述逆变型电源侧故障方向判断方法,只需将判断结果中的“正向故障”与“反向故障”互换即可,具体从略。

### 3 仿真验证与分析

为验证本文提出的方向判据的有效性,利用PSCAD/EMTDC搭建图1所示电网的仿真模型,分别针对不同故障点( $f_1$ — $f_4$ )、不同类型以及金属性和非金属短路故障进行了仿真验证。仿真模型中各元件参数如下:新能源厂站为光伏电站,额定容量为60 MV·A,逆变器出口额定电压为480 V,经箱变升至35 kV电压等级,直流母线电压为1200 V,直流母线电容为8000  $\mu$ F,发生不对称短路故障时的低电压穿越控制策略采用负序电流抑制方式;系统侧变压器 $T_1$ 与升压变 $T_2$ 额定容量为70 MV·A(逆变型电源容量占比30%),额定电压分别为220 kV/110 kV、110 kV/35 kV,短路阻抗为6.22%;联络线的电压等级为110 kV,长度为20 km,正、负序阻抗为 $0.04+j0.302 \Omega/\text{km}$ ,零序阻抗为 $0.19+j0.75 \Omega/\text{km}$ 。

#### 3.1 金属性短路故障仿真验证

保护安装处的各序电压和电流由全周傅氏算法得出,由于篇幅所限,仅给出部分仿真波形图,不同情况故障下的判断结果则通过表格形式给出。如无特别说明,下文中电压和电流幅值均为二次侧值,电压额定值为100 V,电流额定值为1 A,  $U_{\text{set}2} = U_{\text{set}0} = 3 \text{ V}$ ,  $U_{\text{set}1} = 15 \text{ V}$ 。

图4给出了逆变型电源侧正向(点 $f_1$ )发生三相短

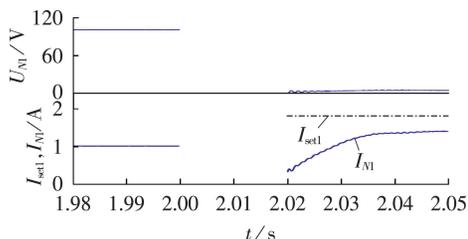


图4 发生三相短路故障时保护2正序电压、电流幅值  
Fig.4 Amplitude of positive-sequence voltage and current of Protection 2 under three-phase short circuit fault

路故障时,正序电压和电流二次值的计算结果。图中,故障时刻为2 s,电流、电压采用全周傅氏算法计算,计算结果2.02 s后有效(2~2.02 s区间为无效结果,未显示,后同)。可以看出,点 $f_1$ 发生短路故障时,正序电压幅值低于低压阈值,即  $U_{N1} = 1.65 \text{ V} < U_{\text{set}1}$ ,方向元件将采用电流幅值比较判断故障方向。此时  $I_{N1} = 0.45 \text{ A} < I_{\text{set}1}$  ( $I_{\text{set}1} = 1.8I_n = 1.8 \text{ A}$ ),保护2正确判断为正向短路故障。

图5、6分别为正、反方向不同故障点(点 $f_1$ 和 $f_2$ )发生两相短路故障时 $k_{21}$ 的计算结果。由图5可知,点 $f_1$ 发生短路故障时,  $k_{21} = 0.112 < k_{\text{set}21}$ ,判断为正向故障;由图6知,点 $f_2$ 发生短路故障时,  $k_{21} = 1.113 > k_{\text{set}21}$ ,判断为反向故障。判断结果均与实际情况相符。

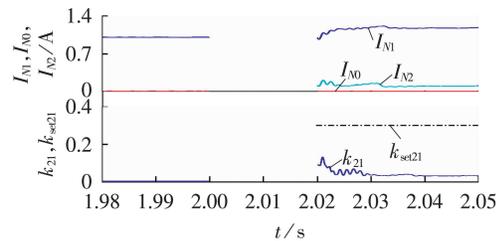


图5 点 $f_1$ 发生两相短路故障时保护2序电流幅值和 $k_{21}$   
Fig.5 Amplitude of sequence current and value of  $k_{21}$  of Protection 2 when two-phase short circuit fault occurs at  $f_1$

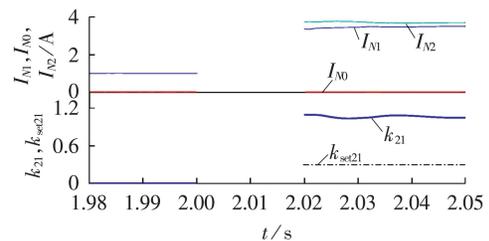


图6 点 $f_2$ 发生两相短路故障时保护2序电流幅值和 $k_{21}$   
Fig.6 Amplitude of sequence current and value of  $k_{21}$  of Protection 2 when two-phase short circuit fault occurs at  $f_2$

综上所述,本文提出的判据在发生三相短路和两相短路故障时均能正确判断方向。当不同故障点发生不同类型金属性短路故障时,保护1、2通过本文提出的方向判据对故障方向进行判断的结果分别如表1和表2所示。

由表1和表2可知,当电网发生不同类型的短路故障时,无论是逆变型电源侧还是系统侧,方向元件均能正确判断故障方向。

#### 3.2 高阻接地故障仿真验证

为了验证本文所述方向判据在高阻接地故障情况下的适用性,对不同故障位置经不同过渡电阻短路的情况进行了仿真。

升压变 $T_2$ 经间隙接地或直接接地时,点 $f_1$ 经

表 1 保护 1 方向元件判断结果

Table 1 Directional component judgment result of Protection 1

故障	$U_2/V$	$U_0/A$	$I_1/A$	$I_2/A$	$I_0/A$	比值或 $I_1$	判断结果
$f_{1ABC}$	0	0	7.844	0	0	$I_1 > 1.8 I_n$	正向
$f_{1AB}$	45.40	0	3.774	4.147	0	$k_{21}=1.099$	正向
$f_{1ABN}$	33.18	29.92	4.919	2.966	2.510	$k_{201}=1.113$	正向
$f_{1AN}$	28.37	28.26	2.472	2.485	2.530	$k_{201}=2.029$	正向
$f_{4ABC}$	0	0	0.517	0	0	$I_1 < 1.8 I_n$	反向
$f_{4AB}$	52.10	0	0.997	0.117	0	$k_{21}=0.117$	反向
$f_{4ABN}$	36.87	36.87	1.086	0.099	0	$k_{201}=0.092$	反向
$f_{4AN}$	34.23	34.06	1.020	0.064	0	$k_{201}=0.062$	反向

表 2 保护 2 方向元件判断结果

Table 2 Directional component judgment result of Protection 2

故障	$U_2/V$	$U_0/A$	$I_1/A$	$I_2/A$	$I_0/A$	比值或 $I_1$	判断结果
$f_{1ABC}$	0	0	0.450	0	0	$I_1 < 1.8 I_n$	正向
$f_{1AB}$	52.17	0	0.989	0.111	0	$k_{21}=0.112$	正向
$f_{1ABN}$	38.48	40.64	1.066	0.091	0	$k_{201}=0.085$	正向
$f_{1AN}$	32.13	37.53	1.021	0.058	0	$k_{201}=0.057$	正向
$f_{2ABC}$	0	0	7.024	0	0	$I_1 > 1.8 I_n$	反向
$f_{2AB}$	52.67	0	3.348	3.726	0	$k_{21}=1.113$	反向
$f_{2ABN}$	40.42	40.42	4.283	2.768	2.083	$k_{201}=1.132$	反向
$f_{2AN}$	31.10	40.82	2.121	2.123	2.162	$k_{201}=2.021$	反向

100 Ω 过渡电阻发生单相接地故障,保护 2 方向元件的相应计算结果如图 7 所示。当  $T_2$  中性点经间隙接地时,由于无零序电流,方向元件将自动采用序电流比值  $k_{201}$  进行方向判断。由于  $k_{201}=0.014 < k_{set201}$ ,判断结果为正向故障,与实际情况吻合; $T_2$  中性点直接接地时,零序电流较大,方向元件将采用零序功率方向元件判断故障方向。从图 7 中可知,零序阻抗角约为  $82^\circ$ ,满足正向故障判据。

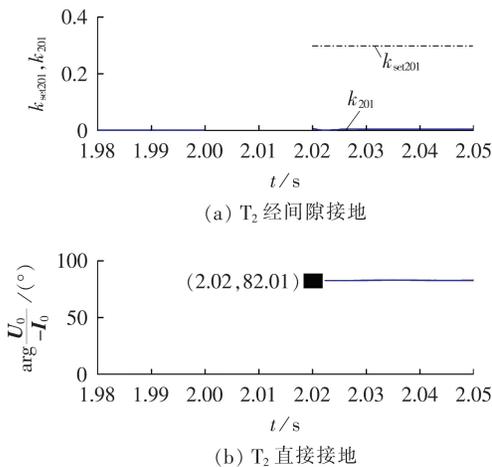


图 7 经 100 Ω 过渡电阻接地时保护 2 方向元件计算结果  
Fig.7 Calculative results of directional element of Protection 2 when grounding fault with 100 Ω transition resistance occurs

表 3 给出了不同位置发生接地故障且  $T_2$  高压侧经间隙接地时,逆变侧方向元件的仿真情况,限于篇幅,其余情况仿真结果不再赘述。

幅,其余情况仿真结果不再赘述。

表 3 经不同过渡电阻短路时故障方向判断情况

Table 3 Fault direction judgment in short circuit with different transition resistors

故障位置	过渡电阻/Ω	$I_1/A$	$I_2/A$	$I_0/A$	$\arg \frac{U_0}{-I_0} / (^\circ)$	$k_{201}$	判断结果
$f_1$	0	1.021	0.058	0	—	0.057	正向
	100	0.999	0.014	0	—	0.014	正向
	200	1.002	0.008	0	—	0.008	正向
	250	1.003	0.005	0	—	0.005	正向
$f_2$	0	2.121	2.123	2.162	262.0	2.021	反向
	100	0.475	0.600	0.595	261.4	2.517	反向
	200	0.690	0.328	0.324	261.9	0.945	反向
$f_3$	250	0.745	0.266	0.263	262.0	0.710	反向
	0	1.021	0.053	0	—	0.051	正向
	100	0.997	0.011	0	—	0.011	正向
	200	0.995	0.010	0	—	0.010	正向
250	0.997	0.008	0	—	0.008	正向	

综上,本文提出的方向判据在发生经不同过渡电阻的短路故障时均能正确判断故障方向,且不受变压器接地方式的影响,具有良好的反映高阻接地故障的能力。

#### 4 结论

电网发生短路故障时,逆变型电源馈出的短路电流特性与同步发电机存在较大差异,将导致传统方向元件动作性能难以满足实际应用要求。本文根据不同故障情况下逆变型电源短路电流和电压的变化特点,提出了一种适用于逆变型电源接入的故障方向判别新方法。主要结论如下:

- (1) 电网发生两相短路故障时,可利用逆变型电源馈出的短路电流中正序电流远大于负序电流的特点,正确判断故障方向;
- (2) 对于不对称接地短路故障,可根据是否存在零序电流,分别采用零序方向元件和  $I_2 + I_0$  与  $I_1$  的比值大小进行故障方向识别,该方法不受升压变压器接线方式的影响;
- (3) 当发生三相对称短路故障时,可采用正序方向元件反映远端故障;通过正序电流幅值比较,消除正序方向元件出口短路死区;
- (4) 对于系统侧方向元件,由于发生反向故障时,故障电流由逆变型电源提供,传统方向元件也存在误判或失效问题,其方向元件判据也需进行修改;
- (5) 仿真结果表明,所提出的故障方向判别方法在各种故障情况下均可正确判断故障方向,且受过渡电阻的影响小,具有良好的工程应用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

[1] 吴洪坤. 太阳能光伏发电技术现状分析[J]. 能源与节能,

- 2017(6):79-80.  
WU Hongkun. Status quo analysis of the solar photovoltaic power generation technology[J]. Energy and Energy Conservation, 2017(6):79-80.
- [2] 许国东,叶杭冶,解鸿斌. 风电机组技术现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3):44-50.  
XU Guodong, YE Hangye, XIE Hongbin. The current state and future development of wind turbine technology[J]. Engineering Sciences, 2018, 20(3):44-50.
- [3] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):65-74.  
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):65-74.
- [4] 顾浩瀚,蔡旭,李征. 基于改进型电网电压前馈的光伏电站低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7):13-19.  
GU Haohan, CAI Xu, LI Zheng. LVRT control strategy based on improved grid-voltage feed-forward for photovoltaic station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):13-19.
- [5] 欧阳森,马文杰. 考虑电压故障类型的光伏逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9):21-26.  
OUYANG Sen, MA Wenjie. Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter considering voltage fault type[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):21-26.
- [6] 杜雄,李珊瑚,刘义平,等. 直驱风力发电故障穿越控制方法综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3):129-135.  
DU Xiong, LI Shanhu, LIU Yiping, et al. Review of fault ride-through control for direct-drive wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):129-135.
- [7] 王小波,宋国兵,常仲学,等. 直驱风电场集中线保护研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(1):122-127.  
WANG Xiaobo, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Novel protection of the power collecting lines in PMSG wind farms[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1):122-127.
- [8] 毕天姝,刘素梅,薛安成,等. 逆变型新能源电源故障暂态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13):165-171.  
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault characteristics of inverter-interfaced renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13):165-171.
- [9] 李彦宾,贾科,毕天姝,等. 逆变型电源对故障分量方向元件的影响机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(10):3230-3236.  
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Influence mechanism of inverter-interfaced renewable energy generators on fault component based directional relay[J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3230-3236.
- [10] 王晨清,宋国兵,汤海雁,等. 选相及方向元件在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1):89-95.  
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of phase selectors and directional relays in power systems integrated with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1):89-95.
- [11] 张惠智,李永丽,陈晓龙,等. 具有低电压穿越能力的光伏电源接入配电网方向元件新判据[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12):106-112.  
ZHANG Huizhi, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. New criteria of directional component in distribution network with photovoltaic generator of low voltage ride through capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):106-112.
- [12] 孔祥平,袁宇波,黄浩声,等. 光伏电源故障电流的暂态特征及其影响因素[J]. 电网技术, 2015, 39(9):2444-2449.  
KONG Xiangping, YUAN Yubo, HUANG Haosheng, et al. Fault current transient features and its related impact factors of PV generator[J]. Power System Technology, 2015, 39(9):2444-2449.
- [13] 焦彦军,梁宵,蒋晨阳. 计及LVRT光伏电站并网下方向元件动作区域计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7):20-24.  
JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang. Directional element action area calculation considering LVRT of grid-connected PV plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):20-24.
- [14] 肖繁. 适用于新能源规模化接入的电网继电保护关键问题研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.  
XIAO Fan. Study on the key problems of relay protection in the power grid with large-scale renewable energy sources[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [15] 许冠军,梁莹玉,查雯婷,等. 方向元件在光伏电站送出线路中的适应性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(5):1632-1639.  
XU Guanjun, LIANG Yingyu, CHA Wenting, et al. Adaptability analysis of directional relay for transmission line emanating from photovoltaic power plants[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1632-1639.
- [16] 贾科,顾晨杰,毕天姝,等. 大型光伏电站汇集系统的故障特性及其线路保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9):189-198.  
JIA Ke, GU Chenjie, BI Tianshu, et al. Fault characteristics and line protection within the collection system of a large-scale photovoltaic power plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9):189-198.
- [17] 翦志强,司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14):126-130.  
JIAN Zhiqiang, SI Tuqin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14):126-130.
- [18] 熊小伏,欧阳金鑫,文安. 电网故障时双馈风电机组定子电压特性及影响分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14):143-149.  
XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin, WEN An. An analysis on impacts and characteristics of stator voltage of DFIG-based wind turbine generator under grid short circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14):143-149.
- [19] 欧阳金鑫,熊小伏. 计及转子励磁控制的双馈感应发电机短路电流研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6083-6092.  
OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu. Research on short-circuit current of doubly-fed induction generators under rotor excitation control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34):6083-6092.
- [20] 何仰赞. 电力系统分析:上册[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002:268.

#### 作者简介:



刘 玮

刘 玮(1973—),男,江西新建人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

赖清华(1993—),男,江西龙南人,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: laiqhust@163.com);

刘慧媛(1982—),女,河南邓州人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

张 哲(1962—),男,湖南株洲人,教授,博士,研究方向为电力系统继电保护、新能源及超导技术。

(编辑 任思思)

## Novel method of fault direction identification for inverter-interfaced power supply access

LIU Wei<sup>1</sup>, LAI Qinghua<sup>2</sup>, LIU Huiyuan<sup>3</sup>, ZHANG Zhe<sup>2</sup>, TAN Taoliang<sup>3</sup>

(1. Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Yangjiang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Yangjiang 529500, China)

**Abstract:** The characteristics of short circuit current of renewable energy sources are quite different from those of traditional generators. When applied to tie lines and collector lines of renewable energy stations, the traditional direction components may not operate correctly. A novel method of fault direction identification suitable for the inverter-interfaced power supply access based on the fault features of renewable energy sources is proposed. The fault type is judged by sequence voltage, and the fault direction is identified according to the difference of sequence current ratio and current amplitude between forward and backward faults. The digital simulative results show that the proposed method can correctly judge the fault direction in different fault types, and is less affected by the transition resistance, so it has good engineering application value.

**Key words:** renewable energy sources; inverter power; direction components; fault direction; relay protection; criterion

(上接第 176 页 continued from page 176)

## Analysis of operation and reactive power compensation characteristics for four-winding inductive filtering transformer at fundamental frequency

HUANG Zhao<sup>1</sup>, LUO Longfu<sup>1</sup>, SHI Saimei<sup>2</sup>, TIAN Ye<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-power Sources Area, Shaoyang University, Shaoyang 422004, China)

**Abstract:** On the basis of multi-winding transformer structure, magnetic balance equations and implementing restraint of inductive filtering, a radiation equivalent circuit model of a FWIFT (Four Winding Inductive Filtering Transformer) is deduced, a mathematical model is built, and characteristics of operation and reactive power compensation based on inductive filtering method at the fundamental frequency are mainly analyzed. Through a prototype simulation using MATLAB, experiment and an engineering test of a 220 kV substation, it is verified that the operating characteristics and reactive power compensation of the FWIFT can be achieved by the filtering winding connected capacitors at fundamental frequency. The simulative and test results show that the operation function of the FWIFT is similar to the traditional three winding transformer, and the grid-side voltage RMS (Root-Mean-Square) values are slightly increased, but the current RMS values are moderately reduced, and so that the power factor is improved at fundamental frequency.

**Key words:** four-winding inductive filtering transformer; equivalent circuit model; reactive power compensation; capacitors; inductive filtering method

# 附录

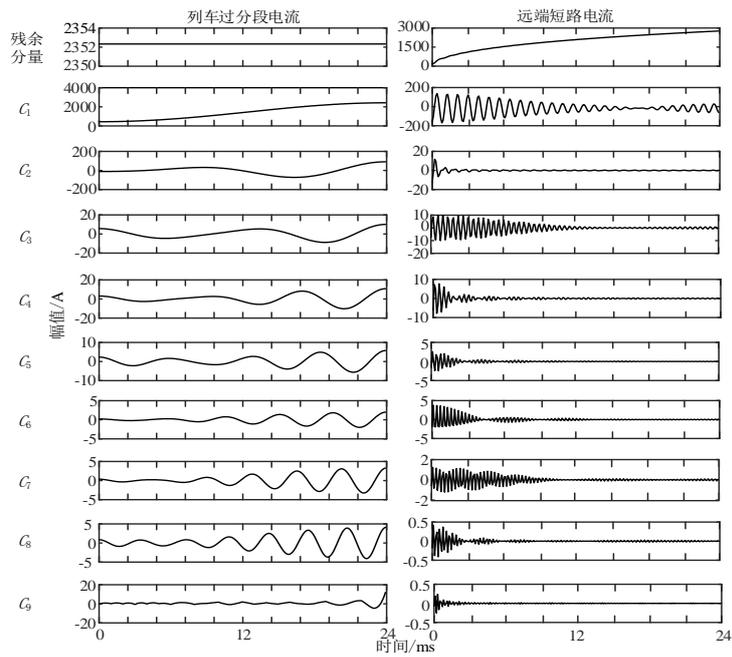


图 A1 列车过分段电流、远端短路电流 EWT 分解结果

Fig.A1 EWT decomposition results of train over-section current and distal short circuit current waveform

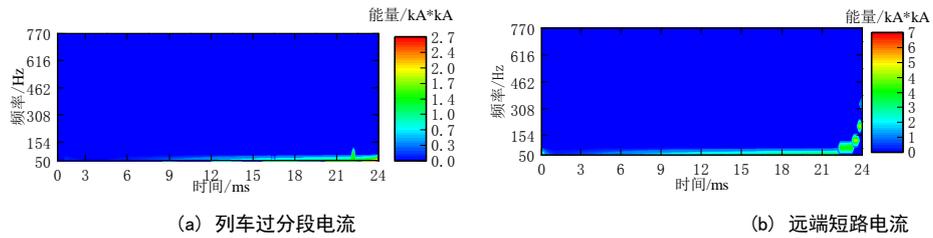


图 A2 列车过分段电流、远端短路电流的能量分布

Fig.A2 Energy distribution of train over-section current and distal short circuit current