

DOI: 10.7667/PSPC171086

## 逆变型电源对距离保护的影响机理分析

李彦宾, 贾科, 毕天姝, 闫人溢, 陈蕊, 杨奇逊

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 新能源电源接入使得电网故障特征发生根本性改变, 传统继电保护应用于新能源接入系统时存在适应性问题。针对工频量距离保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性问题, 推导了典型低穿控制策略下逆变型电源短路电流表达式, 分析了短路电流幅值和相角特性及其影响因素。在此基础上, 分析了送出线路发生各类短路故障时两侧工频量距离保护在不同阻抗继电器接线方式下的动作性能。研究表明, 逆变型电源短路电流幅值受限和相角受控使得场站侧工频量距离保护容易出现不正确动作、系统侧工频量距离保护能更加可靠地动作, 该结论不受阻抗继电器接线方式影响。基于 RTDS 的仿真结果验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 距离保护; 影响机理; 送出线路; 逆变型电源

### Impact of inverter-interfaced renewable energy generators on distance protection

LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, YAN Renfu, CHEN Rui, YANG Qixun

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** With renewable energy generators integrated into power system, the fault current characteristics are greatly influenced. There exist adaptability issues when traditional protections are used in such system. Focusing on power-frequency based distance protection configured on the transmission line emanating from Inverter Interfaced Renewable Energy Generators (IIREGs), the fault current of the IIREG is calculated under typical fault ride through controls and its amplitude and angular characteristics and effect factors are analyzed. Then the operation performances of impedance relay with both AG element and BC element are discussed under both symmetrical and asymmetrical faults. Results show that despite of the AG element or the BC element, the impedance relay of the IIREG side refuses to operate easily under all kinds of fault types, while that of the system side can operate more reliably. Simulations on RTDS verify the conclusions.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900503), National Natural Science Foundation of China (No. 51407067), and Fundamental Research Funds for Central Universities (No. 2016ZZD01).

**Key words:** distance protection; influence mechanism; transmission line; inverter interfaced renewable energy generator

## 0 引言

距离保护具有保护范围和灵敏度受运行方式影响小的优点, 因而广泛应用于高电压等级的复杂电网中。然而风电、光伏等新能源电源通过变流器并

网, 其故障特性受控制策略影响而呈现与同步发电机截然不同的特点, 导致基于同步发电机故障特性构建的传统继电保护面临挑战<sup>[1-4]</sup>。因此有必要研究距离保护在新能源电源接入系统中的适应性。

目前规模化新能源电源接入对距离保护的影响已有一些研究结果。文献[5-7]针对双馈型风电场, 分析了双馈风机非工频的转速频分量和等值正负序阻抗特性对送出线路距离保护的影响。文献[8-10]进一步提出了考虑双馈型风机特性的各种距离保护

**基金项目:** 国家重点研发计划资助(2016YFB0900503); 国家自然科学基金项目(51407067); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016ZZD01)

新方案。可见以上研究结论均只适用于双馈型风机接入系统。在永磁风机、光伏等逆变型电源对距离保护的影响分析方面, 文献[11]针对含永磁型风场在内的各类风场, 分析了风电故障特性对送出线路风场侧测距式和补偿式距离保护的影响, 其中对于工频量距离保护, 仅指出谐波会导致工频相量提取不准确, 没有分析其他特性对工频量距离保护的影响。文献[12]针对逆变型新能源场站, 考虑典型控制策略, 仅仿真分析了送出线路场站侧工频量距离保护的動作性能, 相关结论缺乏理论依据。同时, 文献[11-12]均没有分析逆变型新能源场站故障特性对系统侧距离保护動作性能的影响。

本文针对大型逆变型新能源场站送出线路, 分析了场站侧和系统侧工频量距离保护的動作性能。首先推导了典型低穿控制目标下逆变型电源的短路电流表达式, 分析了幅值特性和相角特性及其影响因素。在此基础上, 分析了送出线路发生各类短路故障时场站侧和系统侧工频量距离保护的動作性能, 得出了适应性结论。基于 RTDS 的仿真结果验证了研究结论的正确性。

## 1 逆变型电源故障特性分析

逆变型电源典型拓扑如图 1 所示, 主要包括发电单元、逆变器和出口滤波器。电源发出的电能经箱变升压后并入汇集系统。

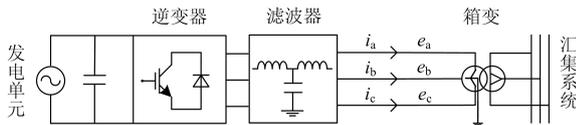


图 1 逆变型电源拓扑

Fig. 1 Topology of inverter-interfaced renewable energy generator

当电网发生不对称故障时, 为更好地抑制故障电流波动、顺利实现故障穿越, 逆变型电源通常采用正、反转同步旋转坐标系对正、负序电流分别控制, 并以消除负序电流为低穿控制目标, 此时逆变器控制系统的正、负序电流参考值为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} i_d^{+*} = 2(e_d^+ P^* + e_q^+ Q^*) / [3(e_d^+)^2 + 3(e_q^+)^2] \\ i_q^{+*} = 2(e_q^+ P^* - e_d^+ Q^*) / [3(e_d^+)^2 + 3(e_q^+)^2] \\ i_d^{-*} = i_q^{-*} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $e_d^+$ 、 $e_q^+$  为逆变型电源出口三相电压  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  经坐标变换后的正序  $d$ 、 $q$  轴电压;  $P^*$ 、 $Q^*$  分别为故障穿越过程中控制系统的有功、无功功率参考值。

常见控制系统以消除负序电流为目标, 故逆变型电源稳态短路电流仅含正序电流, 可由式(1)表示的正序  $d$ 、 $q$  轴电流参考值经坐标反变换得到

$$i_\phi = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(P^*)^2 + (Q^*)^2}{(e_d^+)^2 + (e_q^+)^2}} \cos(\omega t + \theta_0 + \varphi + \theta_\phi) \quad (2)$$

式中: 下标  $\phi$  为相别;  $\omega$  为工频电角速度;  $\theta_0$  为故障时刻  $d^+$  轴与  $\alpha$  轴夹角;  $\theta_a=0^\circ$ ,  $\theta_b=-120^\circ$ ,  $\theta_c=120^\circ$ ;  $\varphi = \arctan(e_q^+ P^* - e_d^+ Q^*) / (e_d^+ P^* + e_q^+ Q^*)$ 。

由式(2)可知, 逆变型电源稳态短路电流为三相对称工频电流, 其幅值与电压跌落程度及低穿过程中控制系统的功率参考值相关, 初相角除与这两个因素相关外, 还与故障时刻相关。

考虑故障后电压严重跌落时, 三相短路电流幅值会超过逆变器最大允许值  $I_{lim}$ , 为保证逆变器的安全, 控制策略中往往增加限幅环节, 当三相电流中最大幅值  $i_{max}$  超过  $I_{lim}$  时, 正序  $d$ 、 $q$  轴电流参考值分别重置为  $i_d^{+*} \times I_{lim} / i_{max}$ 、 $i_q^{+*} \times I_{lim} / i_{max}$ 。此时逆变型电源短路电流幅值受限, 但初相角不受限幅环节影响。

综上, 典型低穿控制策略下逆变型电源稳态短路电流幅值受限, 初相角受控时变, 这与传统同步发电机短路电流特性截然不同。

## 2 工频量距离保护動作性能分析

基于上述逆变型电源故障特性, 下面分析工频量距离保护在逆变型电源接入系统中的動作性能。对于如图 2 所示系统, 待分析距离保护安装在送出线路场站侧和系统侧, 即图中的  $Z_w$  和  $Z_s$ 。

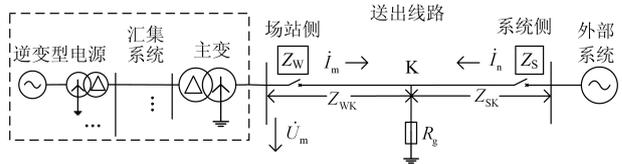


图 2 含逆变型新能源场站的系统示意图

Fig. 2 Diagram of a system with inverter-interface renewable energy power plant

考虑系统中短路往往存在过渡电阻, 假定送出线路发生经  $R_g$  短路, 则场站侧距离保护测量阻抗为

$$Z_w = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{I}_m Z_{wk} + (\dot{I}_m + \dot{I}_n) R_g}{\dot{I}_m} = Z_{wk} + Z_{ad} \quad (3)$$

式中:  $\dot{U}_m$ 、 $\dot{I}_m$  分别为输入特定阻抗继电器接线方式的电压、电流, 对于接地阻抗继电器有  $\dot{U}_m = \dot{U}_\phi$ ,

$\dot{I}_m = \dot{I}_\phi + k \cdot 3 \dot{I}_{W0}$ , 对于相间阻抗继电器有  $\dot{U}_m = \dot{U}_{\phi\phi}$ ,  $\dot{I}_m = \dot{I}_{\phi\phi}$ ,  $\dot{U}_\phi$  和  $\dot{I}_\phi$ 、 $\dot{U}_{\phi\phi}$  和  $\dot{I}_{\phi\phi}$  分别为保护安装处故障相的电压和电流、故障相间的电压差和电流差,  $\dot{I}_{W0}$  为场站侧保护安装处零序分量, 补偿系数  $k = (Z_0 - Z_1) / 3Z_1$ ,  $Z_0$ 、 $Z_1$  分别为送出线路单位长度零序、正序阻抗;  $\dot{I}_n$  为系统侧电流;  $Z_{WK}$  为短路点到场站侧保护安装处的正序阻抗;  $Z_{ad}$  为过渡电阻产生的附加阻抗。

以上给出了场站侧距离保护测量阻抗的表达式, 对于系统侧也有类似表达式。下面结合逆变型电源短路电流特征, 对送出线路发生各类短路故障时场站侧和系统侧距离保护的動作性能进行详细分析。

### 2.1 三相短路

三相经电阻  $R_g$  接地短路时测量阻抗可由接地或相间阻抗继电器获得。下面分别对两种接线方式下测量阻抗性质及距离保护性能展开分析。

#### 1) 接地阻抗继电器

三相短路时系统侧和场站侧接地阻抗继电器的测量阻抗分别为(以 A 相为例)

$$Z_S = Z_{SK} + \left( 1 + \frac{\dot{I}_{WA}}{\dot{I}_{SA}} \right) R_g \quad (4)$$

$$Z_W = Z_{WK} + \left( 1 + \frac{\dot{I}_{SA}}{\dot{I}_{WA}} \right) R_g \quad (5)$$

式中:  $Z_{SK}$  为短路点到系统侧保护安装处的正序阻抗;  $\dot{I}_{WA}$ 、 $\dot{I}_{SA}$  分别为场站侧、系统侧 A 相电流。

考虑场站侧短路电流幅值受限, 故相量  $\dot{I}_{WA} / \dot{I}_{SA}$  幅值很小, 由式(4)知系统侧附加阻抗近似为  $R_g$ 。可见逆变型电源幅值受限的特性减弱了过渡电阻对系统侧测量阻抗的影响, 在保护区内发生故障时系统侧距离保护发生拒动的可能性大大下降。

对于式(5), 由于相量  $\dot{I}_{SA} / \dot{I}_{WA}$  的幅值很大, 故场站侧附加阻抗值也很大; 而附加阻抗的性质则由相量  $\dot{I}_{SA} / \dot{I}_{WA}$  的相角决定。考虑逆变型电源短路电流相角受控时变, 相量  $\dot{I}_{SA} / \dot{I}_{WA}$  相角可能在  $0 \sim 360^\circ$  变化。若  $\dot{I}_{SA} / \dot{I}_{WA}$  的相角处于  $0^\circ \sim 180^\circ$ , 则附加阻抗表现为幅值很大的感性阻抗, 在保护区内发生故障时场站侧距离保护极易拒动; 若  $\dot{I}_{SA} / \dot{I}_{WA}$  的相角处于  $180^\circ \sim 360^\circ$ , 则附加阻抗表现为幅值很大的容性阻抗, 在保护区外发生故障时场站侧距离保护容易误动。

#### 2) 相间阻抗继电器

以 BC 两相为例, 系统侧和场站侧相间阻抗继电器的测量阻抗分别为

$$Z_S = Z_{SK} + \left( 1 + \frac{\dot{I}_{WB} - \dot{I}_{WC}}{\dot{I}_{SB} - \dot{I}_{SC}} \right) R_g \quad (6)$$

$$Z_W = Z_{WK} + \left( 1 + \frac{\dot{I}_{SB} - \dot{I}_{SC}}{\dot{I}_{WB} - \dot{I}_{WC}} \right) R_g \quad (7)$$

式中:  $\dot{I}_{WB}$ 、 $\dot{I}_{WC}$  分别为场站侧 B 相、C 相电流;  $\dot{I}_{SB}$ 、 $\dot{I}_{SC}$  分别为系统侧 B 相、C 相电流。

考虑三相短路时系统侧和场站侧三相短路电流均对称, 可知式(6)、式(7)分别与式(4)、式(5)相等, 因此相间阻抗继电器接线方式下系统侧和场站侧距离保护的動作性能与接地阻抗继电器接线方式情况下的距离保护動作性能对应相同。

### 2.2 两相短路

两相短路时测量阻抗仅由相间阻抗继电器求取。假定送出线路发生 BC 两相经  $R_g$  短路, 系统侧和场站侧相间阻抗继电器的测量阻抗分别为

$$Z_S = Z_{SK} + \frac{\dot{I}_{WB} + \dot{I}_{SB}}{\dot{I}_{SB} - \dot{I}_{SC}} R_g \quad (8)$$

$$Z_W = Z_{WK} + \frac{\dot{I}_{WB} + \dot{I}_{SB}}{\dot{I}_{WB} - \dot{I}_{WC}} R_g \quad (9)$$

由于场站侧短路电流远小于系统侧, 故  $\dot{I}_{WB} + \dot{I}_{SB} \approx \dot{I}_{SB}$ ,  $\dot{I}_{SB} - \dot{I}_{SC} \approx 2\dot{I}_{SB}$ , 由式(8)知系统侧附加阻抗约为  $0.5R_g$ 。可见逆变型电源幅值受限的特性减弱了过渡电阻对系统侧测量阻抗的影响, 在保护区内发生故障时系统侧距离保护发生拒动的可能性大大下降。

对于式(9), 考虑场站侧三相电流对称, 则  $\dot{I}_{WB} - \dot{I}_{WC} = 1.732 \dot{I}_{WB} e^{j30^\circ}$ , 又  $\dot{I}_{WB} + \dot{I}_{SB} \approx \dot{I}_{SB}$ , 因此场站侧附加阻抗性质由  $\dot{I}_{SB} / \dot{I}_{WB}$  的相角特性决定。与式(5)类似, 若  $\dot{I}_{SB} / \dot{I}_{WB}$  的相角处于  $30^\circ \sim 210^\circ$ , 则附加阻抗表现为幅值很大的感性阻抗, 在保护区内发生故障时场站侧距离保护极易拒动; 若  $\dot{I}_{SB} / \dot{I}_{WB}$  的相角处于  $-150^\circ \sim 30^\circ$ , 则附加阻抗表现为幅值很大的容性阻抗, 在保护区外发生故障时场站侧距离保护容易误动。

### 2.3 接地故障

以 BC 两相分别经  $R_g$  接地为例, 分析送出线路发生接地故障时两侧距离保护的動作行为。

#### 1) 接地阻抗继电器

以 B 相为例, 系统侧和场站侧接地阻抗继电器的测量阻抗分别为

$$Z_S = Z_{SK} + \frac{\dot{I}_{SB} + \dot{I}_{WB}}{\dot{I}_{SB} + k \cdot 3 \dot{I}_{S0}} R_g \quad (10)$$

$$Z_W = Z_{WK} + \frac{\dot{I}_{WB} + \dot{I}_{SB}}{\dot{I}_{WB} + k \cdot 3\dot{I}_{W0}} R_g \quad (11)$$

式中,  $\dot{I}_{S0}$  为系统侧保护安装处零序电流。

由于逆变型电源短路电流受限, 两相接地时场站侧三相电流几乎全为零序电流, 则  $\dot{I}_{WB} \approx \dot{I}_{W0}$ 。考虑场站侧零序等值阻抗仅由主变零序阻抗构成, 而系统侧零序等值阻抗由外部主电网线路、变压器零序阻抗串并联组成, 前者阻抗值往往大于后者, 使得在幅值上满足  $|\dot{I}_{W0}| < |\dot{I}_{S0}|$ 。因此, 系统侧附加阻抗值一般小于  $R_g$ , 而场站侧附加阻抗值则大于  $R_g$ 。当保护区内发生故障时, 系统侧距离保护往往能可靠动作, 而场站侧距离保护则可能拒动。

### 2) 相间阻抗继电器

系统侧和场站侧相间阻抗继电器的测量阻抗分别与式(6)和式(7)相同。

考虑场站侧短路电流几乎全为零序分量电流, 故  $\dot{I}_{WB} - \dot{I}_{WC} \approx 0$ 。由式(6)知系统侧附加阻抗约为  $R_g$ 。可见逆变型电源幅值受限的特性减弱了过渡电阻对系统侧测量阻抗的影响, 在保护区内发生故障时系统侧距离保护发生拒动的可能性大大下降。

由式(7)可知,  $\dot{I}_{WB} - \dot{I}_{WC} \approx 0$  导致场站侧附加阻抗值远大于  $R_g$ , 在保护区内发生故障时场站侧距离保护仍较易拒动。

综上所述, 当送出线路发生各类短路故障时, 受逆变型电源幅值受限和相角受控时变影响, 系统侧工频量距离保护的附加阻抗几乎呈现为纯阻性, 且阻抗值不超过过渡电阻值, 该侧保护能够更加可靠地动作; 而场站侧工频量距离保护的附加阻抗呈现为阻感性或阻容性, 且阻抗值远大于过渡电阻值, 该侧保护容易发生不正确动作。

## 3 仿真验证

结合新能源场站实际数据, 在 RTDS 中建立如图 2 所示仿真系统, 验证送出线路两侧工频量距离保护的動作性能。各元件参数为: 逆变型电源额定容量为 1.5 MW, 额定电压为 0.69 kV, 逆变器定向于  $d^+$  轴, 低穿控制目标为消除负序电流, 有功和无功参考值分别设为  $e_d^+$  和  $1.5e_d^+ (0.9 - e_d^+)^{[14-15]}$ , 限幅值取 2 倍额定值。箱变额定容量为 1.6 MVA, 额定电压为 35 kV/0.69 kV, Dyn 接线, 短路阻抗为 6.76%, 具有扩容功能。等值汇集线电阻为 0.275  $\Omega$ , 电感为 1 024  $\mu$ H。主变额定容量为 200 MVA, 额定电压为 220 kV/35 kV, YNd 接线, 短路阻抗为 6%。送出线路额定电压为 220 kV, 总长为 40 km, 正、负序阻抗为 0.076+j0.338  $\Omega$ /km, 零序阻抗为 0.284+j0.824  $\Omega$ /km,

正序、零序电容分别为 0.008 6  $\mu$ F/km、0.006 1  $\mu$ F/km。外部系统三序阻抗均为 0.2+j6.283  $\Omega$ 。

以距离保护 I 段为例, 设置两侧保护 I 段的保护范围均为线路全长的 85%, 阻抗继电器动作特性选择方向圆特性。为更好地对比两侧距离保护动作行为, 故障位置均设在线路中点。

### 3.1 三相短路

图 3 给出了送出线路中点在 0 s 发生三相经 5  $\Omega$  接地时相量  $\dot{I}_{WA} / \dot{I}_{SA}$  的幅值、相角以及两种接线方式下线路两侧的测量阻抗。

由图 3(a)、图 3(b)可知,  $\dot{I}_{WA} / \dot{I}_{SA}$  幅值为 0.076 83、远小于 1, 相角为  $-30.65^\circ$ , 与理论分析一致; 导致场站侧测量阻抗值很大, 其轨迹未进入方向圆内部, 如图 3(c)所示, 因此场站侧距离保护 I 段拒动。同时系统侧测量阻抗轨迹进入方向圆内部, 如图 3(d)所示, 其距离保护 I 段可靠动作。

进一步由图 3(c)、图 3(d)可知, 两种接线方式下各侧测量阻抗轨迹在暂态过程中由于涉及故障前和故障后采样值而呈现无规律变化, 但进入稳态后基本接近, 验证了三相短路时两侧距离保护性能与阻抗继电器接线方式无关。

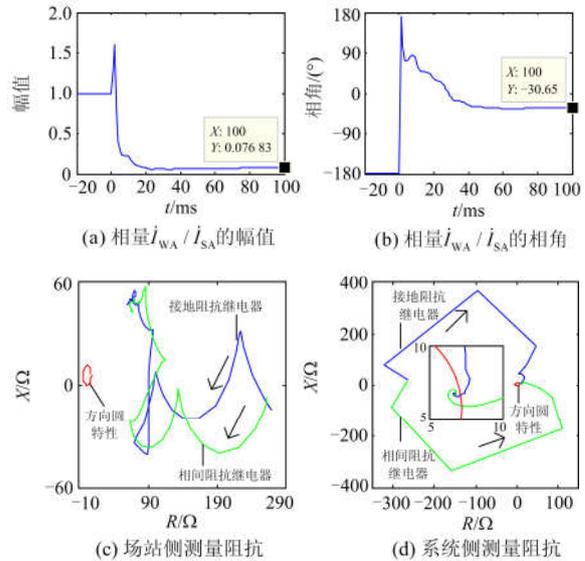


图 3 送出线路中点发生三相经 5  $\Omega$  接地时两侧距离保护在接地和相间阻抗继电器方式下的动作性能

Fig. 3 Impedance calculated by AG element and BC element when three phase fault with 5  $\Omega$  resistance occurs on the middle of the outgoing transmission line

### 3.2 两相短路

图 4 给出了送出线路中点在 0 s 发生 BC 两相经 5  $\Omega$  短路时故障特性和距离保护动作行为仿真结果。

对于系统侧, 由图 4(a)可知,  $\dot{I}_{WB} + \dot{I}_{SB}$  幅值近

似为  $i_{SB} - i_{SC}$  幅值的一半, 与理论分析相同, 使得系统侧附加阻抗呈现纯阻性, 由图 4(c)可知, 附加阻抗稳态值为  $2.59+j0.15 \Omega$ , 与理论值  $0.5R_g=2.5 \Omega$  十分接近, 测量阻抗轨迹进入方向圆内, 如图 4(d)所示, 该侧距离保护 I 段可靠动作。

对于场站侧, 由图 4(b)可知, 相量  $i_{SB} / i_{WB}$  相角为  $-17.79^\circ$ , 使得场站侧附加阻抗呈现为阻容性, 由图 4(c)知其稳态值为  $27.89-j31.19 \Omega$ , 该侧测量阻抗轨迹位于方向圆外部、距离保护 I 段拒动。

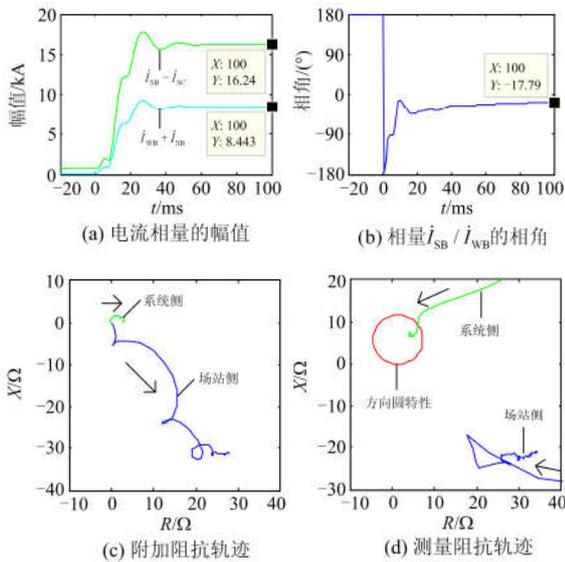


图 4 送出线路中点发生 BC 两相经  $5 \Omega$  短路时两侧故障特性及距离保护动作行为

Fig. 4 Fault features and operation performance of distance relay when BC fault with  $5 \Omega$  resistance occurs on middle of the outgoing transmission line

### 3.3 接地故障

图 5 给出了送出线路中点在  $0 \text{ s}$  发生 BC 两相分别经  $5 \Omega$  接地时两种接线方式下两侧距离保护附加阻抗和测量阻抗。

对于接地阻抗继电器接线, 由图 5(a)可知, 系统侧和场站侧附加阻抗稳态值分别为  $4.61+j0.94 \Omega$  和  $9.64+j13.44 \Omega$ , 可见前者阻抗值小于过渡电阻值  $5 \Omega$ , 而后者阻抗值大于  $5 \Omega$ , 与理论分析一致; 导致系统侧测量阻抗轨迹进入方向圆内部, 距离保护 I 段可靠动作, 而场站侧测量阻抗轨迹处于方向圆外部, 距离保护 I 段拒动, 如图 5(b)所示。

对于相间阻抗继电器接线, 由图 5(c)可知, 系统侧和场站侧附加阻抗稳态值分别为  $5.29+j0.17 \Omega$  和  $69.4-j36.4 \Omega$ , 可见前者阻抗值接近过渡电阻值  $5 \Omega$ , 而后者阻抗值远大于  $5 \Omega$ , 与理论分析一致;

导致系统侧测量阻抗轨迹进入方向圆内部, 距离保护 I 段可靠动作, 而场站侧测量阻抗轨迹处于方向圆外部, 距离保护 I 段拒动, 如图 5(d)所示。

同时对比图 5(b)、图 5(d)中场站侧测量阻抗轨迹可以发现, 相间阻抗继电器接线时场站侧测量阻抗轨迹偏离方向圆的程度要远大于接地阻抗继电器接线, 对应的距离保护 I 段更容易拒动。

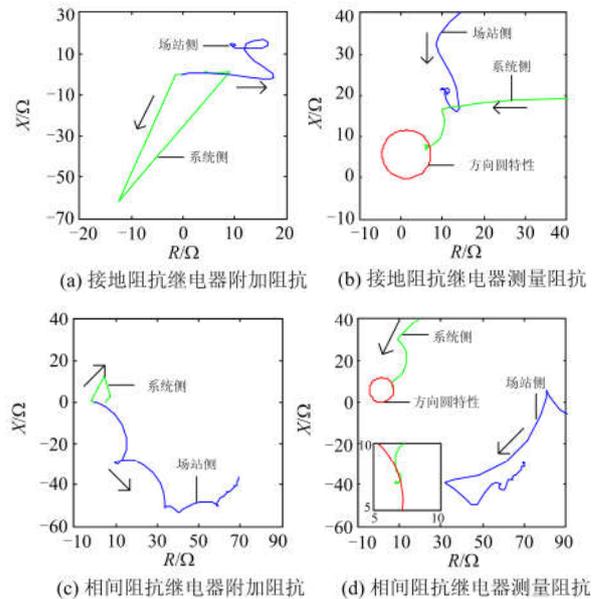


图 5 送出线路中点发生 BC 两相分别经  $5 \Omega$  接地时两侧距离保护动作行为

Fig. 5 Operation performance of distance relay when BC fault with  $5 \Omega$  resistance occurs on the middle of outgoing transmission line

## 4 结论

本文针对逆变型新能源场站送出线路, 分析了逆变型电源短路电流特征及其对送出线路两侧工频量距离保护的影响, 得到如下结论:

1) 受故障穿越控制策略的影响, 逆变型电源短路电流呈现出幅值受限、相角受控的特性, 这与传统同步发电机短路电流特性截然不同。

2) 对于场站侧工频量距离保护, 区内发生各类经过渡电阻短路故障时, 受逆变型电源幅值受限、相角受控的影响, 系统侧电流的助增作用增强, 使得附加阻抗远大于过渡电阻, 该侧距离保护容易发生拒动。

3) 对于系统侧工频量距离保护, 区内发生各类经过渡电阻短路故障时, 场站侧电流的助增作用减弱, 过渡电阻对测量阻抗的影响下降, 该侧距离保护不易发生拒动。

## 参考文献

- [1] 韩璐, 李凤婷, 王春艳, 等. 风电接入对继电保护的影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 163-169.  
HAN Lu, LI Fengting, WANG Chunyan, et al. A survey on impact of wind farm integration on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 163-169.
- [2] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources—a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [3] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 37-47.  
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Impact of doubly-fed wind system short-circuit current features on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.
- [4] JIA K, GU C, XUAN Z, et al. Fault characteristics analysis and line protection design within a large-scale photovoltaic power plant[J]. IEEE Transactions on Smart Grid (Early Access).
- [5] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(6)—风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.  
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [6] HOOSHYAR A, AZZOUZ M A, EL-SAADANY E F. Distance protection of lines connected to induction generator-based wind farms during balanced faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1193-1203.
- [7] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 撬棒电路对风电场侧联络线距离保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 30-36.  
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Impact of crowbar on wind farm side interconnection line distance protection and mitigation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 30-36.
- [8] 侯俊杰, 樊艳芳, 钟显, 等. 适应于风电接入系统的抗高阻接地时域方程距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 122-128.  
HOU Junjie, FAN Yanfang, ZHONG Xian, et al. Research on high resistance grounding time domain equation based distance protection for wind power accessed power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 122-128.
- [9] 杨增力, 孔祥平, 王力军, 等. 适用于双馈风电场联络线的距离保护方案[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 252-260.  
YANG Zengli, KONG Xiangping, WANG Lijun, et al. Distance protection scheme for interconnection line of doubly-fed induction generator based wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 252-260.
- [10] 洪树斌, 范春菊, 陈实. 考虑双馈异步风机特性的自适应接地距离保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 124-133.  
HONG Shubin, FAN Chunju, CHEN Shi. Adaptive ground distance protection considering doubly-fed induction generator characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 124-133.
- [11] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 10-15.  
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of distance protection in power system integration with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.
- [12] HOOSHYAR A, AZZOUZ M A, EL-SAADANY E F. Distance protection of lines emanating from full-scale converter-interfaced renewable energy power plants—part I: problem statement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1770-1780.
- [13] KABIRI R, HOLMES D G, MCGRATH B P. Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1660-1668.
- [14] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S].
- [15] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2012[S].

收稿日期: 2017-07-20; 修回日期: 2018-02-01

作者简介:

李彦宾(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: lyb\_zjpi@126.com

贾科(1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制、新型配电网故障定位与恢复。E-mail: ke.jia@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)