

DOI: 10.7667/PSPC161757

光伏并网系统送出线路不对称故障的差动保护灵敏度研究

王秀莲, 崔云龙, 胡广

(沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 针对光伏并网发电系统的故障特性, 分析了在并网送出线路发生不对称跌落时, 比率制动特性差动保护在光伏逆变器有无无功补偿条件下的灵敏度。结果表明, 在无功补偿状态下, 光伏并网发电系统送出线部分的传统比率制动特性差动保护灵敏度下降。通过比较传统比率制动特性曲线的整定方式, 不过原点的特性曲线在灵敏度的方面具有更大优势。在此基础上, 考虑到不对称故障中零序电流受故障电阻和负荷电流影响小及低电压穿越(LVRT)期间以电网电压正序分量定向的逆变器控制策略, 零序电流作为保护判据的传统比率制动式差动保护, 由于不受无功补偿电流的影响且保护动作整定值较小, 具有更高的灵敏度, 作为光伏送出线路的保护效果更佳。通过 Simulink 搭建光伏并网发电系统仿真模型验证了这一结论。

关键词: 不对称跌落; LVRT; 比率制动; 零序电流; 无功补偿; 灵敏度

Sensitivity studies on differential protection during the output line of grid-connected photovoltaic systems occur asymmetrical faults

WANG Xiulian, CUI Yunlong, HU Guang

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: For fault characteristic of grid-connected photovoltaic (PV) systems, the sensitivity of ratio-restraining characteristic differential protection on the condition of PV inverter reactive/active power compensation is studied when the output line of grid-connected PV systems occur asymmetrical failures. The results show that sensitivity of differential protection of ratio-restraining characteristic will decrease in the state of reactive power compensation. The characteristic curve without passing through the origin has a greater advantage in terms of sensitivity, after comparing the tuning mode of traditional ratio-restraining characteristic curve. On this basis, taking into account the zero-sequence current which is less affected by fault resistance and load current in asymmetrical fault, and inverter control strategy oriented by grid voltage positive sequence component during LVRT, traditional ratio-restraining differential protection which takes zero-sequence current as protection criterion possesses a higher sensitivity, for it is not affected by reactive current and has a small protection action setting value, it is better for the protection of output lines of photovoltaic power station. This conclusion is verified by simulation model of grid-connected photovoltaic system built on Simulink.

Key words: asymmetrical faults; LVRT; ratio-restraint; zero-sequence current; reactive power compensation; sensitivity

0 引言

由于光伏电站的装机容量日益增大, 为保证电网安全稳定运行, 光伏发电系统故障期间保护措施的研究至关重要^[1]。当公用电网发生电压跌落故障时, 需按照国标 GB/T19964-2012《光伏电站接入电力系统技术规定》的要求进行低电压穿越, 并向电网馈送一定量的无功电流支撑电网电压恢复, 在 LVRT 期间, 电网的继电保护装置快速排除故障。然而, 当光伏送出线部分发生电压故障时, 并网点检测到的电压亦会降低, 控制系统依然按照电网故

障情况进行 LVRT 控制。

文献[2-4]指出, 低电压穿越控制对依靠电流大小门槛值及依靠检测电压和电流之间相位关系来判断故障的保护, 有着不可忽略的影响。在电力系统的故障类型中不对称短路故障约占其 90%以上, 因此, 对不对称故障的保护研究具有更深远的意义。文献[5-6]对故障分量差动保护进行研究, 鉴于故障分量的差动保护采用对侧电流的故障分量而不是故障时的全电流, 具有更高的灵敏度。进而文献[7-8]指出, 基于零电流的差动保护不受负荷电流及故障电阻的影响, 兼顾可靠性的同时, 灵敏度也保持在

较高水平。然而, 上述文献均没有考虑到光伏电池等弱电源特性以及 LVRT 期间无功补偿对差动保护灵敏度的影响。

本文在光伏并网发电系统低电压穿越期间, 对用于并网送出线部分的传统比率制动式差动保护的灵敏度进行分析, 结果表明, 由于 LVRT 期间无功补偿电流的注入, 比例制动式差动保护的灵敏度降低。当大电流接地系统发生单相短路接地故障时, 故障相中含有较大零序电流, 且零序电流不受故障电阻和负荷电流的影响。考虑到故障期间逆变器采用以电网正序分量定向、输出对称的三相电流、故障相不含零序电流以及为保护电力电子器件安全逆变器的输出进行限度控制等因素, 使得零序电流作为差动保护判据具有动作电流整定值低且不受无功补偿电流影响的优势。

1 光伏低电压穿越标准

随着光伏发电在电力系统中的渗透率不断增加, 其势必对电网的稳定性造成深刻影响^[9-10]。考虑到电网发生故障时光伏逆变器突然脱网, 会给主网造成冲击, 使故障进一步蔓延^[11-12]。因此, 各国电网公司均对光伏并网系统提出了严格的技术要求, 规定大中型光伏电站应具备一定的低电压穿越能力。在我国, 光伏并网逆变器在电网发生不对称短路故障期间, 无功电流的输出程度还没有具体标准。因此, 参考如图 1 所示的德国对无功电流与电压跌落深度之间关系的相关规定。

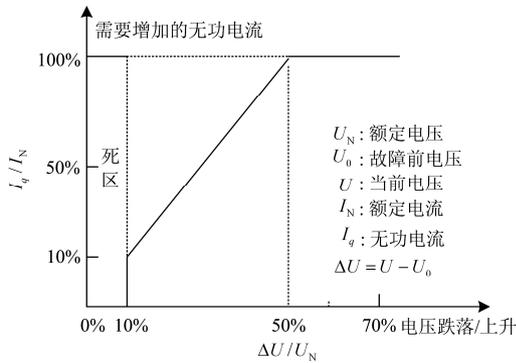


图 1 无功电流与电压跌落深度之间的关系

Fig. 1 Relationship between reactive current and voltage drop depth

图 1 表明, 在电网电压跌落至额定电压的 90% 以下时, 光伏逆变器必须向电网注入无功电流用以支撑电网电压恢复, 每 1% 的电压跌落, 光伏电站至少需要提供 2% 的无功电流, 当电压跌落至额定电压的 50% 以下时, 应向电网提供 100% 的无功电流, 且

响应速度应在 200 ms 以内。

2 光伏逆变器控制

2.1 光伏逆变器拓扑结构

逆变器为光伏并网发电系统的核心, 通过功率管的开关配合将光伏阵列输出的能量转换为交流电馈入电网。图 2 为光伏并网逆变器的拓扑结构, 图中, U_{dc} 为直流侧电压, V_{abc} 为逆变器输出交流电压, i_{abc} 为并网交流电流, e_{abc} 为电网侧电压, R 、 L 为输出电阻及电感。

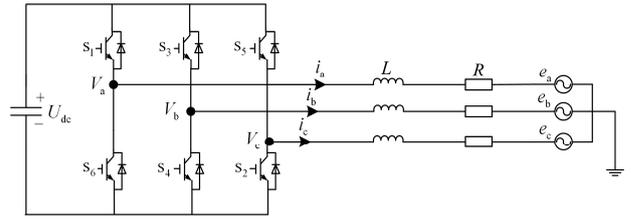


图 2 光伏逆变器拓扑结构

Fig. 2 PV inverter topology

若假设三相回路中等效电阻均为 R , 各相电感均为 L , 忽略功率开关管的开关损耗、导通压降及分布参数的影响, 三相并网逆变器在 dq 旋转坐标系下的状态方程为

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{di_d}{dt} & -\omega L \\ \omega L & R + L \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: v_d 、 v_q 为逆变器输出电压的 dq 轴分量; i_d 、 i_q 为并网电流的 dq 轴分量; e_d 、 e_q 为电网电压的 dq 轴分量。

2.2 光伏逆变器控制策略

由于功率和电流之间存在着相互调节的关系, 在常规的控制策略^[13-14]中, 通过给定额定功率来调节并网电流, 以满足谐波含量低和波形质量好等并网要求。在电网不平衡时, 并网电流的相频特性发生变化, 不再以电网电压为基准而是以电网电压正序分量为基准, 逆变输出电流不含负序及零序分量, 达到并网要求。

检测到并网电压不平衡时, 光伏逆变器输出的复功率表达式为

$$S = 1.5(u_{dq}^P e^{j\omega t} + u_{dq}^N e^{-j\omega t})(i_{dq}^P e^{j\omega t} + i_{dq}^N e^{-j\omega t})^* = 1.5u i^* = P + jQ \quad (2)$$

式中: u_{dq}^P 、 u_{dq}^N 为逆变输出电压经 dq 解耦后的正负序分量; i_{dq}^P 、 i_{dq}^N 为逆变输出电流经 dq 解耦后的正

负序分量。

有功、无功功率可表示为

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \\ Q = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

式中： P_0 、 Q_0 分别为 P 、 Q 的平均值； P_{c2} 、 P_{s2} 、 Q_{c2} 、 Q_{s2} 分别为 P 、 Q 的正余弦二倍频分量峰值，且有如下公式：

$$\begin{cases} P_0 = 1.5(u_d^P i_d^P + u_q^P i_q^P + u_d^N i_d^N + u_q^N i_q^N) \\ Q_0 = 1.5(u_q^P i_d^P - u_d^P i_q^P + u_q^N i_d^N - u_d^N i_q^N) \\ P_{c2} = 1.5(u_d^N i_d^P + u_q^N i_q^P + u_d^P i_d^N + u_q^P i_q^N) \\ P_{s2} = 1.5(u_q^N i_d^P - u_d^N i_q^P - u_q^P i_d^N + u_d^P i_q^N) \\ Q_{c2} = 1.5(u_q^N i_d^P - u_d^N i_q^P + u_q^P i_d^N - u_d^P i_q^N) \\ Q_{s2} = 1.5(-u_d^N i_d^P - u_q^N i_q^P + u_d^P i_d^N + u_q^P i_q^N) \end{cases} \quad (4)$$

在并网节点电压发生单相短路接地故障条件下，为保证并网点电流满足电网要求，需对正负序电流的 dq 轴分量进行控制以实现抑制逆变输出电流的负序分量及输出三相对称电流的目标。即根据式(4)求得的电流参考值只含有正序分量 i_d^P 和 i_q^P ，可令 $i_d^N = i_q^N = 0$ ，忽略 P_{c2} 、 P_{s2} 、 Q_{c2} 、 Q_{s2} 。得到并网电流参考指令值为

$$\begin{bmatrix} i_d^P \\ i_q^P \\ i_d^N \\ i_q^N \end{bmatrix} = \frac{2P_0}{3D} \begin{bmatrix} e_d^P \\ e_q^P \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{2Q_0}{3D} \begin{bmatrix} e_q^P \\ -e_d^P \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， $D = (e_d^P)^2 + (e_q^P)^2$ 。

图3所示为电压跌落期间的逆变器控制策略，在

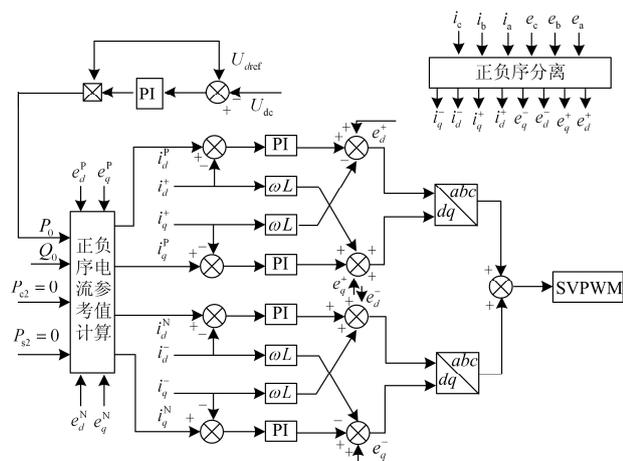


图3 电压不对称跌落时逆变器控制系统

Fig. 3 Inverter control system when asymmetric voltage drop

光伏送出线发生单相短路接地故障时，运用电网电压正序分量定向的控制策略，计算出网侧电压和并网电流的正负序分量，控制锁相环节分离出的正负序电流跟踪指令值，用以消除负序分量，并消除二倍频波动量。电流环 PI 调节输出量经 PARK 反变换及空间电压矢量调制(SVPWM)，控制逆变器输出三相对称的并网电流。

3 比率制动式差动保护灵敏度分析

电流差动保护的理论基础来源于基尔霍夫电流定律，利用被保护线路两端的差动电流对故障进行判断。

传统比率制动特性差动保护判据为

$$\begin{cases} I_d > I_s & (I_z \leq I_{z0}) \\ I_d > I_s + K_1(I_z - I_{z0}) & (I_z > I_{z0}) \end{cases} \quad (6)$$

式中： I_s 为启动电流，通常取为 $(0.2 \sim 0.3)I_N$ ； I_{z0} 为拐点电流，一般取为 $(0.7 \sim 1.0)I_N$ ； K_1 为比率制动特性的斜率，可取为 0.5； I_d 和 I_z 为差动电流和制动电流。

$$\begin{cases} I_d = |I_1 - I_2| \\ I_z = |I_1 + I_2| / 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中， I_1 、 I_2 分别为电流互感器两侧电流向量(I_1 正方向为流入互感器， I_2 正方向为流出互感器)。

零序差动电流的保护判据为

$$\begin{cases} |I_{m0} + I_{n0}| > K |I_{m0} - I_{n0}| \\ |I_{m0} + I_{n0}| > I_{op0} \end{cases} \quad (8)$$

式中， I_{op0} 为动作门槛值。

3.1 动作电流值对灵敏度影响分析

差动保护的動作性能通常根据比较制动系数的大小来评价，发生如图4所示的单相短路接地故障时，在差动保护制动电流 I_{res} 相同的前提下：区内故障时制动系数越大，即动作电流值越大，保护动作越不灵敏；区外故障时制动系数越大，保护越不易误动。

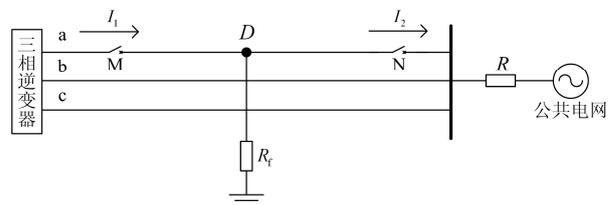


图4 单相短路故障示意图

Fig. 4 Diagram of single-phase short-circuit fault

制动系数定义为

$$K_{\text{res}} = \frac{I_{\text{op}}}{I_{\text{res}}} \quad (9)$$

式中: I_{op} 为差动保护的動作电流; I_{res} 为差动保护的制动电流。

对于区外故障, 零序差动保护的差动电流与制动电流分别来自于被保护线路的两侧零序不平衡电流标量的和差。零序不平衡电流往往由测量误差及暂态分量的计算误差引起, 造成线路两侧零序不平衡电流的标量差大于标量和, 从而使保护装置误动作。因此, 以零序电流作为差动保护判据的整定原则, 应按照躲避外部单相短路接地故障时的最大不平衡电流整定。

$$I_{\text{op},0} = K_{\text{rel}} K_{\text{ap}} K_s f_i I_{\text{max},0} \quad (10)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数, 一般取为 1.3; K_{ap} 为非周期分量系数, 通常取 1.5~2.0; K_s 为同型系数, 取为 0.5; f_i 为电流互感器误差, 一般取为 0.1; $I_{\text{max},0}$ 为单相接地短路时的最大零序电流。

光伏并网发电系统在电压跌落期间, 出于保护电力电子器件的目的, 对逆变器输出电流加以限幅(本文限幅为 $1.2I_N$)。在区外发生单相接地短路故障时, 逆变器输出的最大故障电流 I_{max} 即为限幅值。在大电流接地系统中, 故障相的正序、负序及零序电流大小相等方向相同, 即 $3I_{\text{max},0} = I_{\text{max}}$ 。从而整定的零序动作电流值为 $I_{\text{op},0} = (0.12 \sim 0.16)I_N$, 与全相量电流的传统比率制动差动保护的動作电流值相比更低, 灵敏度更高。

3.2 LVRT 无功补偿对灵敏度的影响

内部故障时故障点两侧的零序电流的相位仅与故障点两侧的阻抗角有关, 而全电流需考虑到功角变化及过渡电阻的影响, 通常灵敏度会降低^[15-17]。根据规定的正方向, 故障点两侧的相位差 φ 满足: 内部故障时, $90^\circ \leq \varphi \leq 270^\circ$, $\cos \varphi < 0$, 理想情况 $\cos \varphi = -1$; 外部故障时, $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, $\cos \varphi \geq 0$, 理想情况 $\cos \varphi = 1$ 。

本文基于电网电压正序分量定向的逆变器控制策略, 使得逆变器输出电流理想状态下仅含有正序分量, 对于全相电流作为判据的传统比率差动保护的影响可忽略不计, 而基于零序电流的比率差动保护, 可等价于单电源电路, 差动电流与制动电流大小均由网侧电源的短路电流决定。为支撑故障电网的电压快速恢复, 逆变器需输出一定量的容性无功电流馈入电网, 然而, 无功电流的注入导致了电力系统功率因数的变化, 即并网电流的相位超前。

内部故障时, 逆变侧故障相的相移发生变化, 而网侧不受影响, 导致故障点两侧相位差在理想情况下不再是 180° 。如图 5 所示, 故障点两侧故障相的差动电流减小, 而制动量增大。

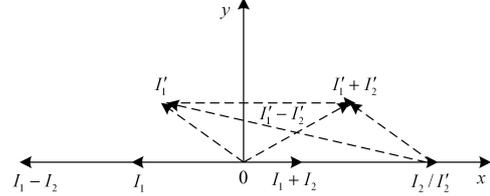


图 5 故障期间电流矢量关系

Fig. 5 Current vector relationship during a fault

差动保护的灵敏度定义为

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_d}{I_{\text{op}}} \quad (11)$$

式中, I_{op} 为差动保护的動作电流值(不过原点的特性曲线边界条件)。

根据差动保护灵敏度的定义可知, 動作电流值不变的前提下, 保护的灵敏度随着差动量的减小而降低。LVRT 期间, 全电流作为判据的差动保护随着无功补偿量的注入, 制动量增大, 使得動作电流值也变大, 而差动电流值减小, 灵敏度随之降低。与之不同的是, 由于故障期间逆变输出电流不含零序分量, 零序电流作为判据的差动保护可不考虑无功补偿量大小带来的影响, 灵敏度仍保持在较高水平。

4 仿真分析

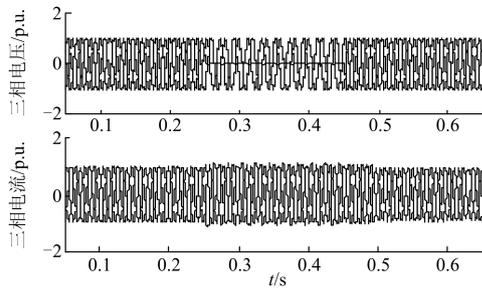
为验证前文分析结果的正确性, 本文在 Matlab 上搭建了额定功率为 500 kW 的光伏并网发电系统的仿真模型。表 1 是光伏并网发电系统具体参数。单相短路接地故障发生在 0.25 s, 持续时间为 200 ms。

表 1 系统参数设置

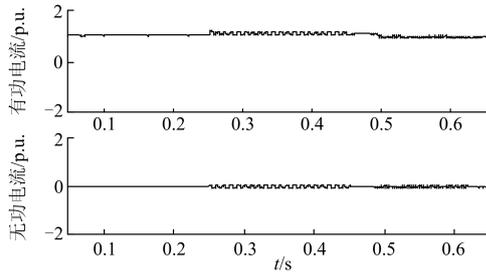
Table 1 Design of system parameters

参数	取值
交流电网电压有效值	270 V
交流电网频率	50 Hz
直流侧给定电压	900 V
直流侧滤波电容	14 000 μF
逆变侧滤波电感	0.2 mH
跌落持续时间	0.2 s
电压跌落方式	单相短路接地

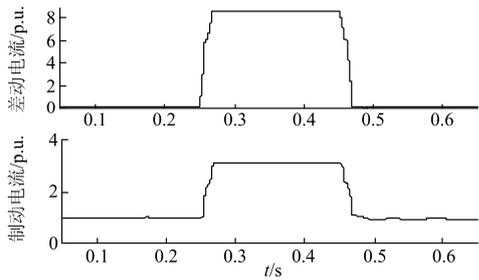
为验证故障期间电网电压定向的控制策略和 LVRT 期间无功补偿对全电流作为判据的传统比率制动式差动保护的影响及零序电流作为判据时差动保护具有较高的灵敏度, 本文在过渡电阻及负荷电阻一定的条件下, 对光伏并网发电系统加以仿真, 并给出具有代表性的仿真波形如图 6—图 8 所示。



(a) 逆变输出三相电压和电流



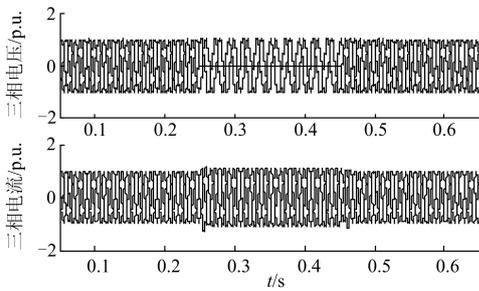
(b) 电流有功和无功分量



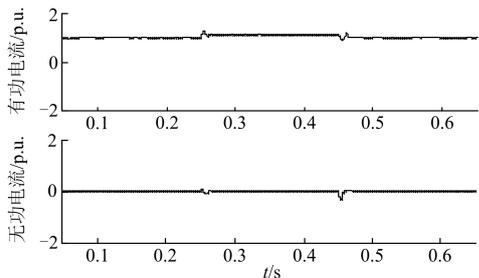
(c) 故障点两侧差动和制动电流

图 6 无 LVRT 控制策略波形

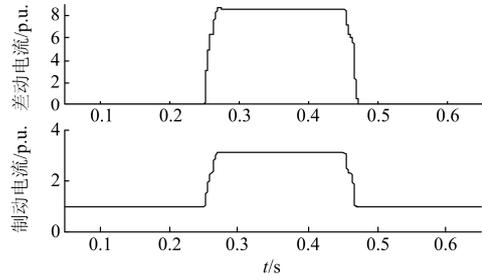
Fig. 6 Waveform of no LVRT control strategy



(a) 逆变输出电压和电流



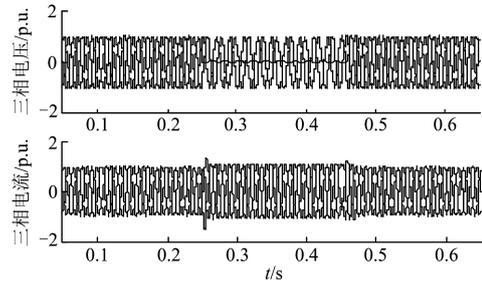
(b) 电流有功和无功分量



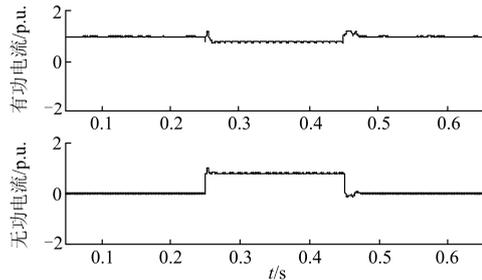
(c) 故障点两侧差动和制动电流

图 7 采用 LVRT 控制策略波形

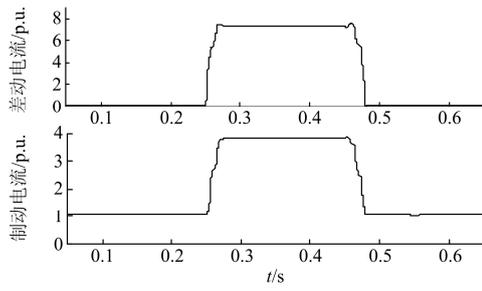
Fig. 7 Waveform of using LVRT control strategy



(a) 逆变输出电压和电流



(b) 电流有功和无功分量



(c) 故障点差动和制动电流

图 8 LVRT 期间无功补偿时波形

Fig. 8 Waveform during LVRT reactive power compensation

通过对比图6(c)、图 7(c)及图 8(c)中故障点两侧的差动电流和制动电流的大小可知,在故障期间,逆变器采用电网电压正序分量定向的控制策略对以全电流作为判据的传统比率制动差动保护的差动电流与制动电流的影响不大,而无功补偿的注入使得故障期间差动电流减小,制动电流增大。根据式(11)

差动保护灵敏度定义计算可知: 并网发电系统不具备 LVRT 能力时, 全电流作为判据的传统比率制动式差动保护的灵敏度 $k_{\text{sen}} = 7.2$, 零序电流作为判据的比率差动保护灵敏度 $k_{\text{sen},0} = 13.2$; 并网发电系统具备 LVRT 能力时, 全电流作为判据的传统比率制动式差动保护灵敏度 $k'_{\text{sen}} = 7.3$, 零序电流作为判据时由于逆变侧输出电流不含零序分量, 因此差动电流为网侧故障相零序电流, 制动电流为差动电流幅值的二分之一, 因此灵敏度 $k'_{\text{sen},0} = 10.4$; 并网发电系统在 LVRT 期间有无功补偿量注入时, 全电流作为判据的传统比率制动式差动保护灵敏度 $k''_{\text{sen}} = 4.8$, 零序电流作为判据的比率制动式差动保护灵敏度 $k''_{\text{sen},0} = 10.4$ 。

根据计算结果可知, 光伏并网发电系统在送出线发生单相短路接地故障条件下, 逆变器是否采用 LVRT 控制策略及是否向电网馈送无功电流时, 零序电流作为判据的传统比率制动式差动保护均具有更高的灵敏度。

5 结论

针对光伏并网发电系统的故障特性, 光伏送出线部分区内发生单相短路接地故障时, 对以全电流以及零序电流作为判据的差动保护的灵敏度进行了研究。经过理论分析与仿真验证, 有如下结论:

1) 不具备 LVRT 能力的光伏并网发电系统, 由于零序电流比率差动的动作电流整定值较低, 制动系数更小, 较之全电流比率差动具有更高灵敏度。

2) 具备 LVRT 能力, 即以电网电压正序分量定向时, 逆变侧不含零序电流, 对全电流比率差动灵敏度没有影响, 而对零序电流比率差动有一定影响, 但较前者仍具有较高的灵敏度。

3) LVRT 期间逆变器向电网发送无功电流时, 全电流比率差动判据, 由于相移发生变化, 差动电流减小, 制动电流增大, 灵敏度随之降低, 而零序电流比率差动的灵敏度不受影响, 保持在较高水平, 更适合于光伏送出线路部分的保护。

参考文献

[1] 雷一, 赵争鸣. 大容量光伏发电关键技术与并网影响综述[J]. 电力电子技术, 2010, 44(3): 16-22.
LEI Yi, ZHAO Zhengming. A review of the key technologies of large capacity photovoltaic power generation and its influence on grid connection[J]. Power Electronics, 2010, 44(3): 16-22.

[2] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动

化设备, 2012, 32(2): 1-8.
ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Analysis of influencing factors of fault current in power system connected to wind power and its influence on relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.

[3] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. Scale photovoltaic power generation on power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.

[4] 刘瑞阳, 薛云灿, 冯宝玥, 等. 光伏发电系统模糊分段变步长算法最大功率点跟踪策略[J]. 热力发电, 2016, 45(5): 48-53.
LIU Ruiyang, XUE Yuncan, FENG Baoyue, et al. A new control strategy for MPPT in photovoltaic system based on fuzzy and variable step size algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(5): 48-53.

[5] 尹项根, 陈德树, 张哲, 等. 故障分量差动保护[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(11): 13-17.
YIN Xianggen, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. Fault component differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 13-17.

[6] 林湘宁, 刘沛. 全电流与故障分量电流比例差动判据的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 29-33.
LIN Xiangning, LIU Pei. Comparative study on the current proportional difference criterion of full current and fault component[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 29-33.

[7] 文明浩, 李瑞生, 王强, 等. 分相电流差动线路保护中零序差动作用分析[J]. 继电器, 2002, 30(12): 42-44.
WEN Minghao, LI Ruisheng, WANG Qiang, et al. Analysis of zero sequence differential action in phase-shifted differential protection[J]. Relay, 2002, 30(12): 42-44.

[8] WANG Xingguo, ZHOU Zexin, DU Dingxiang. A phase selection element for zero sequence current differential protection[C] // International Conference on Power System Technology, Chengdu, China: IEEE, 2014: 362-366.

[9] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Research on the influence of PV grid-connected generation system on power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.

[10] BAI Feifei, LIU Yong, LIU Yilu, et al. A measurement-based approach for power system instability early

- warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 9pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0014-0
- [11] 安志龙. 光伏并网控制策略与低电压穿越技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
AN Zhilong. Research on integration control strategy and low voltage ride-through technology grid-connected PV system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [12] 张宗包, 袁荣湘, 赵树华, 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): 204-209.
ZHANG Zongbao, YUAN Rongxiang, ZHAO Shuhua, et al. Research on micro-grid protection—a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 204-209.
- [13] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 58-64.
ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Research and analysis of low voltage crossing control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 58-64.
- [14] 范柱烽, 毕大强, 任先文, 等. 光储微电网的低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 6-12.
FAN Zhufeng, BI Daqiang, REN Xianwen, et al. Research on low voltage traversing control strategy of optical storage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 6-12.
- [15] 王秀莲, 胡广, 毕大强. 光伏低电压穿越期间无功补偿对差动保护灵敏度的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 52-56.
WANG Xiulian, HU Guang, BI Daqiang. Influence of reactive power compensation on sensitivity of differential protection during PV low-voltage crossing[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 52-56.
- [16] 赵勇, 韩斌, 房刚利. 风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 1-5.
ZHAO Yong, HAN Bin, FANG Gangli. A survey of condition monitoring and fault diagnosis for wind power generators[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 1-5.
- [17] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 53-60.

收稿日期: 2016-10-20; 修回日期: 2017-01-23

作者简介:

王秀莲(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化、智能电网及新能源技术;

崔云龙(1989—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源技术。E-mail: cyl20112011@163.com

(编辑 葛艳娜)