

增强序分量选相元件适应性的光伏并网逆变器序阻抗角重构方案

梁营玉, 卢正杰

(中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 光伏电源的拓扑结构和控制方法与同步发电机有着显著差异, 故其故障特性相较同步发电机产生了实质性的改变, 恶化了传统序分量选相元件的动作性能。推导了将抑制负序电流作为控制目标时光伏电源的序阻抗表达式, 详细分析了序分量选相元件受光伏电源影响的机理。提出了一种新型光伏电源控制方案, 通过重构光伏并网逆变器的序阻抗角来模拟同步发电机的故障特性, 从而辅助序分量选相元件正确判断故障类别。基于PSCAD/EMTDC平台的仿真结果验证了所提控制方案的有效性和可靠性。

关键词: 光伏电源; 选相元件; 故障序阻抗; 并网逆变器; 序阻抗角重构

中图分类号: TM 77

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202109011

0 引言

近年来, 环境和能源问题日益突出, 大规模开发利用太阳能、风能等可再生能源已经成为了一种新的解决途径^[1-3]。随着光伏装机容量在电网中的比重不断增加, 光伏对电力系统安全性和可靠性的影响也日益显著, 传统继电保护方案面临着严峻的挑战^[4-6]。

选相元件是电网自动重合闸和距离保护的核心元件, 其故障相识别的正确性是自动重合闸和距离保护正确动作的前提^[7-9]。传统的选相元件主要分为基于故障电流幅值的相电流差突变量选相元件和基于故障电流相位关系的序分量选相元件^[10-11]。相电流差突变量选相元件通过比较两相之间相电流差突变量的幅值关系确定故障相^[12], 当电网中存在弱电源或者经高过渡电阻发生故障时其动作性能较差; 基于故障电流相位的序分量选相元件不受负荷电流和过渡电阻的影响, 可靠性、灵敏性高^[13]。

目前研究光伏接入电网对选相元件影响的文献较少, 文献[14]推导了双馈风机的等效故障阻抗表达式, 分析了选相元件受风电场影响的详细机理并提出了改良方案, 但其所得结论并不适用于直驱风机、光伏等逆变型电源; 文献[15]从故障序阻抗特性的角度对光伏接入电网给选相元件带来的影响进行了分析; 文献[16]给出了光伏在3种控制目标下的故障电流解析表达式, 从理论上详细分析了选相元件的适应性问题。但是上述文献均未给出应对序分

量选相元件在光伏接入电网后不能正确动作这一问题的解决方案。文献[17]提出了一种基于电压序分量幅值和相角的新型选相元件, 并验证了该选相元件在含光伏电源的微电网中可以正确判断故障类别。然而该方案需要在线路上安装额外的电压互感器, 增加了工程成本和复杂性。

本文从光伏电源故障序阻抗特征的角度出发, 分析了序分量选相元件受光伏电源影响的详细机理; 提出了一种新型光伏电源控制方案, 通过重构光伏并网逆变器的序阻抗角模拟同步发电机的故障特性, 从而辅助序分量选相元件正确动作。各种工况下的仿真结果验证了本文所提方案的有效性和可靠性。

1 光伏接入电网对序分量选相元件的影响

1.1 序分量选相原理

基于序分量电流相位的选相元件主要是利用零、负序电流分量或正、负序电流分量之间的相位差进行选相, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \alpha = \angle \Delta I_0 - \angle \Delta I_2 \\ \beta = \angle \Delta I_1 - \angle \Delta I_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔI_1 、 ΔI_2 、 ΔI_0 分别为保护安装处的正、负、零序故障电流; α 、 β 为对应分量之间的相位差。保护安装处与故障点处各序故障电流之间的关系为:

$$\begin{cases} \Delta I_1 = C_1 I_{F1} \\ I_2 = \Delta I_2 = C_2 I_{F2} \\ I_0 = \Delta I_0 = C_0 I_{F0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_2 、 I_0 分别为保护安装处的负、零序故障电流; I_{F1} 、 I_{F2} 、 I_{F0} 分别为故障点处的正、负、零序故障电流; C_1 、 C_2 、 C_0 分别为保护安装处的正、负、零序故障电流分配系数。

发生A相接地故障时, 由电路复合序网图可

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707193); 中国矿业大学(北京)越崎青年学者资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51707193) and the Yue Qi Young Scholar Project of China University of Mining and Technology(Beijing)

将式(5)、(6)代入常规保护算法意义下的等效正序阻抗的计算公式 $Z_{PV1} = \Delta U_{x1} / \Delta I_{x1}$ 可得:

$$Z_{PV1} = \frac{U_1 [U_1 (\cos \Delta\varphi + j \sin \Delta\varphi) - U_N]}{P_0 (\cos \Delta\varphi + j \sin \Delta\varphi) + Q_0 (\sin \Delta\varphi - j \cos \Delta\varphi) - U_1 I_N} \quad (8)$$

$\Delta\varphi$ 受电压下降幅度以及系统、线路阻抗角影响,在某些故障条件下 $\Delta\varphi < 5^\circ$, 可近似认为 $\cos \Delta\varphi = 1$ 、 $\sin \Delta\varphi = 0$, 则式(8)可化简为:

$$Z_{PV1} = \frac{U_1 (U_1 - U_N)}{P_0 - U_1 I_N - j Q_0} \quad (9)$$

图 4 为 $U_1 = 0.6$ p.u. 的情况下, P_0 、 Q_0 变化时 Z_{PV1} 的幅值和相角, 图中所有变量均为标幺值。由图可见, Z_{PV1} 的幅值和相角随着 P_0 、 Q_0 的变化而变化, 不能视为一个恒定的阻抗。当 $\Delta\varphi$ 不满足 $\Delta\varphi < 5^\circ$ 时, 式(8)无法进一步化简, Z_{PV1} 总是受控制策略、故障条件和负荷电流等因素影响, 不再保持恒定。

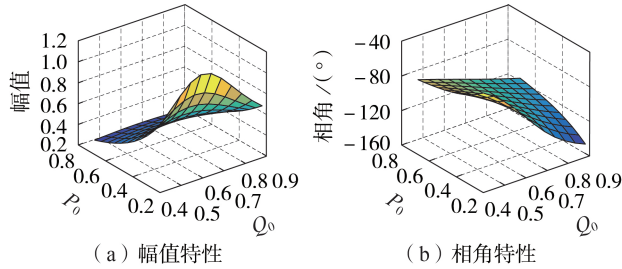


图 4 Z_{PV1} 的幅值和相角特性

Fig.4 Amplitude and phase angle characteristics of Z_{PV1}

由于故障期间光伏电源将抑制负序电流作为控制目标, 理想情况下只输出正序电流, 考虑到信号采样过程中存在噪声和测量误差, 保护元件可能无法可靠、精确地测量负序电流, 负序等效阻抗的幅值和相角存在较大的不确定性。根据上述分析, 光伏电源有别于同步发电机的控制作用导致了其正、负序等效阻抗存在明显的差异, 由式(4)分析可知, 保护安装处的 C_1 、 C_2 不再为实数, 进而导致序分量选相失败。

2 光伏并网逆变器序阻抗角重构方案

2.1 序阻抗角重构实现方法

由前文分析可知, 光伏电源接入电网后, 其正、负序等效阻抗差异性较大的故障特性可能会引起序分量选相元件误选相。针对这一问题, 本节通过阻抗重构技术改变光伏电源的故障序阻抗特性, 从而达到序分量选相元件正确动作的目的。

阻抗为电压与电流之比, 电压主要与系统状态和故障条件有关。与电流相比, 电压的可控性更差, 因此可以通过改变注入的电流重构阻抗。根据第 1 节的分析可知, 故障期间光伏电压的故障序分量向量 $\Delta u_{\alpha\beta}$ 表达式为:

$$\begin{cases} \Delta u_{\alpha\beta 1} = \Delta u_{\alpha 1} + j \Delta u_{\beta 1} = U_1 e^{j(\omega t + \varphi_1)} \\ u_{\alpha\beta 2} = u_{\alpha 2} + j u_{\beta 2} = U_2 e^{-j(\omega t + \varphi_2)} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} U_1 = \sqrt{(\Delta u_{\alpha 1})^2 + (\Delta u_{\beta 1})^2} \\ U_2 = \sqrt{u_{\alpha 2}^2 + u_{\beta 2}^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: 下标“ α ”、“ β ”分别表示经 Clark 变换得到的 α 轴分量和 β 轴分量; φ_1 、 φ_2 分别为正、负序电压分量的初相角, 在同步旋转坐标系中可以表示为式(12)。

$$\varphi_1 = \arctan \frac{\Delta u_{q1}}{\Delta u_{d1}}, \quad \varphi_2 = \arctan \frac{u_{q2}}{u_{d2}} \quad (12)$$

式中: Δu_{d1} 、 Δu_{d2} 和 Δu_{q1} 、 Δu_{q2} 分别为电压 d 轴和 q 轴的正、负序分量。

为了辅助选相元件正确动作, 故障期间光伏电源需要向电网注入特定的正、负序故障电流。假设注入的故障电流幅值为 λI_N , 正、负序故障电流超前故障电压的角度分别为 δ_1 、 δ_2 , 则正、负序故障电流参考值设定为:

$$\begin{cases} \Delta i_{\alpha\beta 1}^* = \Delta i_{\alpha 1}^* + j \Delta i_{\beta 1}^* = \lambda I_N e^{j(\omega t + \varphi_1 + \delta_1 + \pi)} \\ i_{\alpha\beta 2}^* = i_{\alpha 2}^* + j i_{\beta 2}^* = \lambda I_N e^{-j(\omega t + \varphi_2 + \delta_2 + \pi)} \end{cases} \quad (13)$$

根据前文分析得知, 为了不影响电力电子器件的安全运行, 逆变器输出的电流通常不超过额定电流的 1.2 倍, 因此可将 λ 设定为一个较小的值, 如 10%。由式(13)可知, 故障期间光伏电源注入的正序电流为故障前正序电流 $i_{\alpha\beta 1}^{[0]}$ 与正序故障电流 $\Delta i_{\alpha\beta 1}^*$ 的叠加, 即:

$$i_{\alpha\beta 1}^* = i_{\alpha\beta 1}^{[0]} + \Delta i_{\alpha\beta 1}^* = i_{\alpha 1}^{[0]} + \Delta i_{\alpha 1}^* + j(i_{\beta 1}^{[0]} + \Delta i_{\beta 1}^*) \quad (14)$$

为了得到正、反转同步旋转 $dq0$ 坐标系下参考电流的正序分量 i_{dq1}^* 和负序分量 i_{dq2}^* , 将 $i_{\alpha\beta 1}^*$ 和 $i_{\alpha\beta 2}^*$ 分别乘以 $e^{-j\omega t}$ 和 $e^{j\omega t}$, 则故障期间的 i_{dq1}^* 和 i_{dq2}^* 可以表示为:

$$\begin{cases} i_{dq1}^* = i_{d1}^{[0]} + \lambda I_N \cos(\varphi_1 + \delta_1 + \pi) + \\ \quad j[i_{q1}^{[0]} + \lambda I_N \sin(\varphi_1 + \delta_1 + \pi)] \\ i_{dq2}^* = \lambda I_N \cos(\varphi_2 + \delta_2 + \pi) - \\ \quad j\lambda I_N \sin(\varphi_2 + \delta_2 + \pi) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $i_{d1}^{[0]}$ 、 $i_{q1}^{[0]}$ 分别为故障前正序电流的 d 、 q 轴分量。

光伏的等效故障阻抗为故障电压和电流分量的比值, 若实际电流可以精准跟踪参考电流, 则 δ_1 、 δ_2 为阻抗重构后的相角, 将其代入式(15)即可计算出光伏注入的正、负序电流的相位。当系统检测到故障后按照式(15)设置光伏并网逆变器参考电流, 通过逆变器的控制环节实现序阻抗角的重构, 具体控制流程如图 5 所示。

2.2 求解序阻抗角 δ_1 、 δ_2

根据第 1 节的分析, 在图 3 所示的故障序分量网络中存在式(16)所示的关系。

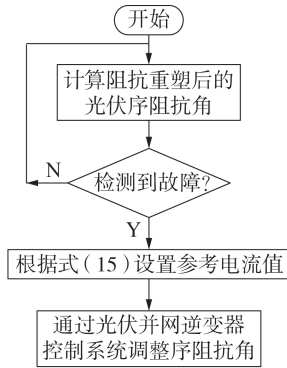


图5 序阻抗角重构流程图

Fig.5 Flowchart of sequence impedance angle reconstruction

$$\begin{cases} \arg Z_{MF1} \approx \arg Z_{NF1} \approx \arg Z_{S1} = \delta_{line1} \\ \arg Z_{MF2} \approx \arg Z_{NF2} \approx \arg Z_{S2} = \delta_{line2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: δ_{line1} 、 δ_{line2} 分别为线路的正、负序阻抗角。

根据式(16), 光伏接入系统的 C_1 、 C_2 可以转化为:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{|Z_{NF1}| + |Z_{S1}|}{|Z_{PV1} + Z_{T1}| \angle (\delta_{Z1} - \delta_{line1}) + |Z_{MF1}| + |Z_{NF1}| + |Z_{S1}|} \\ C_2 = \frac{|Z_{NF2}| + |Z_{S2}|}{|Z_{PV2} + Z_{T2}| \angle (\delta_{Z2} - \delta_{line2}) + |Z_{MF2}| + |Z_{NF2}| + |Z_{S2}|} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \delta_{Z1} = \arg(Z_{PV1} + Z_{T1}) \\ \delta_{Z2} = \arg(Z_{PV2} + Z_{T2}) \end{cases} \quad (18)$$

由式(17)可以看出, 当光伏和主变的等效阻抗的相角与线路阻抗角相等时, C_1 、 C_2 为实数, 选相元件可以正确动作, 其对应的正序阻抗相量关系如图6所示。图中, $\overline{AB}$ 表示主变正序阻抗 Z_{T1} ; δ_{T1} 为 Z_{T1} 的相角; $\overline{OA}$ 、 $\overline{O_1A}$ 、 $\overline{O_2A}$ 分别表示不同幅值的 Z_{PV1} ; δ_{PT1} 为 $Z_{PV1} + Z_{T1}$ 与 Z_{T1} 的夹角。

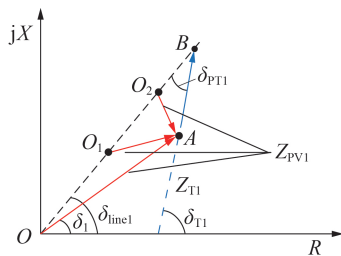


图6 正序阻抗相量关系图

Fig.6 Diagram of relationship between positive sequence impedances

由图6可以看出, Z_{PV1} 在不同幅值下求解出的相角不同。根据前文分析得知, 为了避免损坏电力电子器件, 将 λ 设定为 10%, 利用序电压、电流即可得出 Z_{PV1} 的幅值。

在 $\triangle OAB$ 内, 根据正弦定理得:

$$\frac{|\overline{OA}|}{\sin \delta_{PT1}} = \frac{|\overline{AB}|}{\sin (\delta_{line1} - \delta_{T1})} \quad (19)$$

$$\delta_{PT1} = \delta_{T1} - \delta_{line1}, |\overline{OA}| = |Z_{PV1}|, |\overline{AB}| = |Z_{T1}| \quad (20)$$

由式(19)、(20)可以得到 Z_{PV1} 的相角为:

$$\delta_1 = \delta_{line1} - \arcsin \frac{|Z_{T1}| \sin \delta_{PT1}}{|Z_{PV1}|} \quad (21)$$

同理可得 Z_{PV2} 的相角为:

$$\delta_2 = \delta_{line2} - \arcsin \frac{|Z_{T2}| \sin \delta_{PT2}}{|Z_{PV2}|} \quad (22)$$

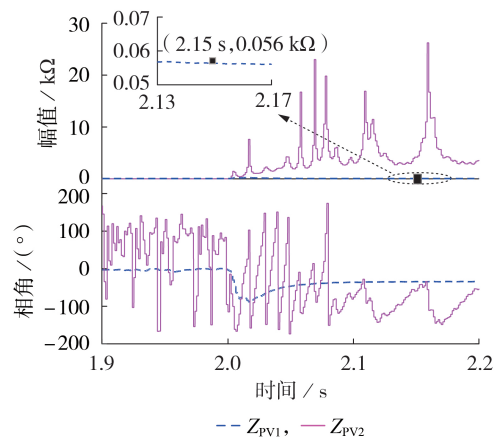
本文所提方案通过阻抗重构技术控制故障网络中光伏等效序阻抗的相角, 从而使得正、负序故障电流分配系数为实数, 保护安装处的正、负序故障电流之间的相位差等于故障点处正、负序故障电流之间的相位差, 消除了光伏电源故障特性对选相元件的影响, 使序分量选相元件能够根据图1正确判断故障类型和相别。

3 仿真实验

为了验证本文理论分析和所提控制方案的正确性, 在 PSCAD / EMTDC 平台中搭建如图2所示的 10 kV 电力系统模型。图中, 光伏发电系统的额定容量为 2 MW; 主变额定容量为 5 MW, 额定变比为 10 kV/0.27 kV, 短路阻抗为 4%; MN 段线路总长为 16 km, 线路正、零序阻抗分别为 $0.0178 + j0.314$ 、 $0.295 + j1.04 \Omega / \text{km}$; 系统等效正、零序阻抗分别为 $0.2 + j3.53$ 、 $0.3 + j1.06 \Omega$ 。仿真过程中, 故障时刻均设置为 2 s。

3.1 控制策略对系统影响的仿真实验

发生 A 相接地故障时, Z_{PV1} 、 Z_{PV2} 的幅值和相角的仿真波形如图7所示。由图可见, 由于故障期间光

图7 发生A相接地故障时, Z_{PV1} 、 Z_{PV2} 的幅值和相角的仿真波形Fig.7 Simulative waveforms of amplitude and angle of Z_{PV1} and Z_{PV2} under phase-A-to-ground fault

光伏并网逆变器将抑制负序电流作为控制目标,导致 Z_{PV1} 的幅值远大于 Z_{PV2} ,负序阻抗角也存在较大的波动。因此,采用抑制负序电流的控制方案时,保护安装处的故障序分量电流与故障点处的故障序分量电流相位不再相等,选相判据失效,序分量选相元件不能正确动作。

在距离光伏电源2 km处发生过渡电阻为0.1 Ω 的A相接地故障,故障发生后启动本文所提方案,故障前后光伏并网逆变器输出电流 i_{inv} 的仿真波形如图8所示。由图可见,故障前、后光伏并网逆变器输出的A相电流最大值分别为5.5、6.08 kA,其增幅不超过20%,这说明本文所提控制方案不会影响电力电子器件和光伏电源的安全运行。

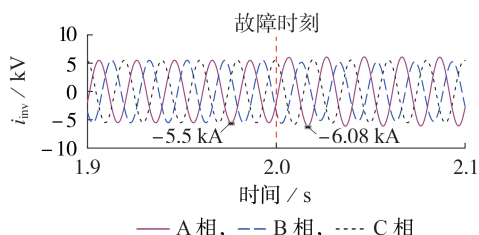


图8 过渡电阻为0.1 Ω 的A相接地故障发生前、后,采用所提控制方案时 i_{inv} 的仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms of i_{inv} before and after phase-A-to-ground fault with 0.1 Ω transition resistance under proposed control scheme

3.2 不同过渡电阻下的仿真验证

距光伏电源8 km处经发生过渡电阻为1、10、20 Ω 的A相接地故障时,分别采用抑制负序电流的控制方案和本文所提控制方案, β 的仿真结果如图9所示。图中, R_t 为过渡电阻;阴影部分为A相接地故障判定区域。由图可见,采用抑制负序电流的控制策略时,序分量选相元件得到的 β 不稳定,甚至会落在A相接地故障判定区域外,导致序分量选相元

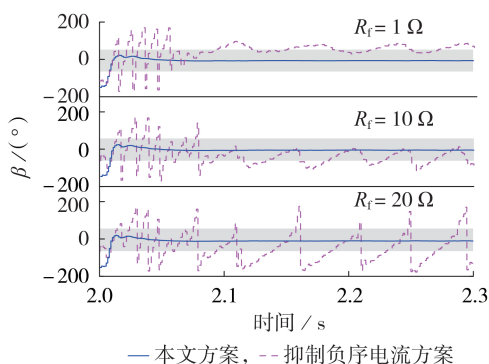


图9 经不同过渡电阻发生A相接地故障时,2种控制方案下 β 的仿真结果对比

Fig.9 Simulative result comparison of β between two control schemes under phase-A-to-ground fault with different transition resistances

件误选相;采用本文所提控制方案时,在不同的过渡电阻下, β 始终位于A相接地故障判定区域内,且接近最大灵敏角0°,序分量选相元件可以正确动作并具有较高的灵敏度。

3.3 不同故障位置、类型下的仿真验证

距光伏电源2、8和12 km处经10 Ω 过渡电阻发生不同类型的故障时,采用本文所提控制方案得到 β 的仿真结果如图10所示。图中, l_{pv} 为故障点与光伏电源的距离。由图可见,达到稳态时不同故障位置对应的 β 值几乎重合;发生A相接地故障、B相接地故障、AB两相接地故障时, β 分别接近0°、-120°、-60°。结合图1可知,采用本文所提控制方案后,序分量选相元件能够准确判断故障类型和故障相,且不受故障位置的影响。

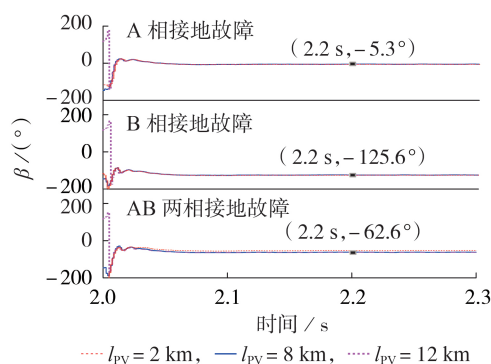


图10 不同的故障位置、类型下,采用所提控制方案时 β 的仿真结果

Fig.10 Simulative results of β with proposed control scheme under different fault types and fault locations

为了进一步验证本文所提控制方案在不同故障类型下的可靠性,表1给出了经不同过渡电阻发生不同类型的故障时,正、负序故障电流相位差的仿真结果。由表可见,采用本文所提控制方案时,在不同的故障类型和过渡电阻下,序分量选相元件均能正确动作,具有较强的耐受过渡电阻能力。

表1 不同故障类型和过渡电阻下选相元件的仿真结果

Table 1 Simulative results of phase selector under different fault types and transition resistances

故障类型		$\beta / (^{\circ})$		
		$R_t = 1 \Omega$	$R_t = 10 \Omega$	$R_t = 20 \Omega$
单相接地	AG	-1.6	-5.1	-5.7
	BG	-121.3	-125.5	-125.7
	CG	119.8	125.0	124.6
相间短路	AB	-59.7	-63.9	-64.6
	BC	-179.8	-183.3	-184.8
	CA	59.8	57.6	55.3
两相接地	ABG	-53.8	-61.9	-64.8
	BCG	-174.6	-182.6	-183.8
	CAG	58.7	57.9	55.1

3.4 抗噪性仿真验证

在实际的继电保护装置中,测量信号会受到噪声干扰,保护方法需要具备一定的抗噪性。为了测试噪声干扰对保护性能的影响,设置距光伏电站8 km处经 $5\ \Omega$ 过渡电阻发生不同类型的故障,在测量电流中加入不同强度的高斯白噪声,序分量选相元件的仿真结果见附录A图A1。由图可见,加入噪声后的仿真结果与加入前相比发生了较小的波动,但在不同故障类型下序分量选相元件仍然能够可靠动作,验证了本文所提控制方案具有较强的抗噪性。

3.5 含光伏电源的IEEE 15节点系统仿真验证

为了进一步验证本文所提控制方案与选相元件协同配合的有效性,在PSCAD/EMTDC平台中搭建了含分光伏电源的IEEE 15节点配电网模型,其系统结构图见附录B图B1^[18]。图中,电网电压等级为11 kV,光伏电源容量为2 MW,并网节点为节点5,线路阻抗和负荷容量如图中所示。不同故障条件下 β 的仿真结果如附录B表B1所示。由表可见,在不同节点发生A相接地故障时,不论过渡电阻为何值, β 的仿真结果都接近 0° ,最大值为 1.4° 、最小值为 -2.2° ,结合图1可知,序分量选相元件能够判定A相接地故障,且具有较高的灵敏度;同理分析可知,在表中其他故障条件下,序分量选相元件均能正确动作。

4 结论

由于光伏并网逆变器的等效阻抗受控制策略、故障条件和逆变器过流能力等因素影响,故障网络中正、负序故障电流分配系数不再为实数,进而导致序分量选相元件无法正确判断故障类型和故障相。根据序阻抗角重构技术,本文提出了一种增强序分量选相元件适应性的控制方案,该方案能够自适应调整光伏电源的故障特性,保证序分量选相元件正确动作,且不受过渡电阻、故障位置等故障条件的影响,具有较高的灵敏度和一定的抗噪声能力,很好地改善了序分量选相元件的动作性能。

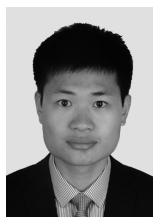
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1):1-14.
- [2] 刘健,林涛,同向前,等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术,2013,37(8):2080-2085.
LIU Jian, LIN Tao, TONG Xiangqian, et al. Simulation analysis on influences of distributed photovoltaic generation on short-circuit current in distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2080-2085.
- [3] 贾科,杨哲,朱正轩,等. 基于电流幅值比的逆变型新能源场站送出线路T接纵联保护[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):82-88.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHU Zhengxuan, et al. Pilot protection based on current amplitude ratio for teed line in inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12):82-88.
- [4] JAMALI S, BORHANI-BAHABADI H. Protection method for radial distribution systems with DG using local voltage measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2):651-660.
- [5] ZHANG Fan, MU Longhua. A fault detection method of micro-grids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the PQ control strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5):4816-4826.
- [6] 李政,卢继平,刘加林,等. 并网光伏电站中性点接地电阻选择与零序保护[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):49-55,147.
LI Zheng, LU Jiping, LIU Jialin, et al. Neutral grounding resistance selection and zero-sequence protection for grid connected photovoltaic power station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12):49-55,147.
- [7] 沈枢,张沛超,方陈,等. 双馈风电场故障序阻抗特征及对选相元件的影响[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):87-92.
SHEN Shu, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Characteristics of sequence impedance of DFIG plant and influence on phase selector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15):87-92.
- [8] 祝高乐,刘青. 含STATCOM输电线路的故障选相方法[J]. 电网技术,2014,38(12):3535-3540.
ZHU Gaole, LIU Qing. Faulty phase selection of transmission line with STATCOM[J]. Power System Technology, 2014, 38(12):3535-3540.
- [9] 梁莹玉,许冠军,李武林,等. 柔性直流换流站对传统选相方法的影响分析及对策[J]. 电工技术学报,2020,35(1):201-212.
LIANG Yingyu, XU Guanjun, LI Wulin, et al. Influence of the integration of MMC-HVDC station on traditional phase selection method and the countermeasure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1):201-212.
- [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] 马静,王希,王增平. 一种基于电流突变量的故障选相新方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(19):117-124,194.
MA Jing, WANG Xi, WANG Zengping. A new fault phase identification method based on phase current difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19):117-124,194.
- [12] 黄涛,陆于平. 适用于双馈风电场的改进电流突变量选相元件[J]. 电网技术,2015,39(10):2959-2964.
HUANG Tao, LU Yuping. Improved superimposed current phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Power System Technology, 2015, 39(10):2959-2964.
- [13] AZZOUZ M A, HOOSHYAR A. Dual current control of inverter-interfaced renewable energy sources for precise phase selection[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5):5092-5102.
- [14] 黄涛,陆于平,凌启程,等. 适应于双馈风电场的改进故障序分量选相方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):123-128.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36

- (4):123-128.
- [15] 陈实,邵能灵,范春菊,等. 逆变型电源接入对选相元件的影响分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):106-112,187.
CHEN Shi,TAI Nengling,FAN Chunju,et al. Influence of inverter-interfaced generator on element of phase selectors [J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(12):106-112,187.
- [16] 李一泉,屠卿瑞,陈桥平,等. 大型光伏电站对送出线路保护选相元件的影响[J]. 电网技术,2018,42(9):2976-2982.
LI Yiquan,TU Qingrui,CHEN Qiaoping,et al. Influence of large-scale photovoltaic power plant on phase-selection elements of line protections[J]. Power System Technology,2018,42(9):2976-2982.
- [17] HOOSHYAR A,EL-SAADANY E F,SANAYE-PASAND M. Fault type classification in microgrids including photovoltaic DGs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(5):2218-2229.
- [18] DAS D,KOTHARI D P,KALAM A. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,1995,17(5):335-346.

作者简介:



梁营玉

梁营玉(1989—),男,山东济宁人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子化电力系统继电保护技术以及柔性交直流输配电技术(E-mail:liangyingyu2013@163.com);

卢正杰(1995—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子化电力系统继电保护技术。

(编辑 任思思)

Sequence impedance angle reconstruction scheme of photovoltaic grid-connected inverter to enhance adaptability of phase selector based on sequence component

LIANG Yingyu,LU Zhengjie

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering,China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083,China)

Abstract:The topology structure and control method of PV(PhotoVoltaic) power source are obviously different from synchronous generator,so its fault characteristics are substantially changed compared with synchronous generator,which deteriorates the operation performance of traditional phase selector. The expression of the sequence impedance of the PV power source is derived when the suppression of negative sequence current is taken as the control target,and the influence mechanism of PV power source on phase selector based on sequence component is analyzed in detail. A novel control scheme for PV power source is proposed,which simulates the fault characteristics of synchronous generators by reconstructing the sequence impedance angle of PV grid-connected inverters,so as to assist phase selector based on sequence component to correctly judge the fault types. Simulative results based on PSCAD/EMTDC platform validate the effectiveness and reliability of the proposed control scheme.

Key words:photovoltaic power source;phase selector;fault sequence impedance;grid-connected inverter;sequence impedance angle reconstruction

附录 A

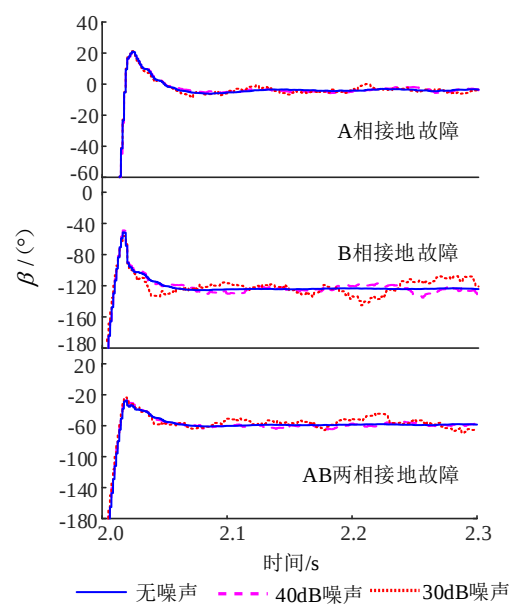


图 A1 在不同故障类型下，加入噪声后的仿真结果

Fig.A1 Simulative results with noise under different fault types

附录 B

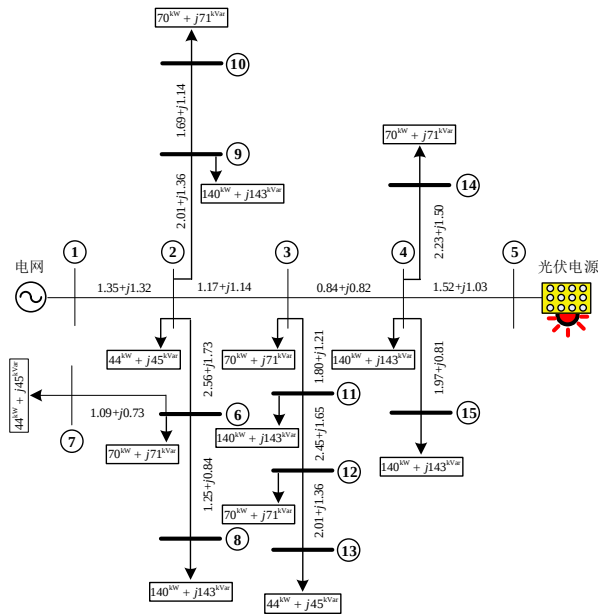


图 B1 含光伏电源的 IEEE 15 节点系统

Fig.B1 IEEE 15-node system with PV power source

表 B1 不同故障条件下序分量选相元件的仿真结果

Tab B1 Simulative results of phase selector based on sequence component under different fault conditions

故障类型	过渡电阻 / Ω	$\beta/ (^{\circ})$		
		节点 3	节点 6	节点 9
A 相 接地	1	-0.7	-1.2	-1.1
	10	-2.2	-0.5	-0.3
	20	-0.9	1.4	1.4
B 相 接地	1	-120.7	-121.4	-121.4
	10	-121.7	-121.1	-120.6
	20	-120.3	-118.5	-118.3
AB 两相 接地	1	-57.8	-62.1	-62.3
	10	-62.2	-65.6	-63.1
	20	-64.1	-67.1	-66.3