

计及 LVRT 光伏电站并网下方向元件动作区域计算

焦彦军, 梁 宵, 蒋晨阳

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对低电压穿越控制策略下的并网光伏电站会影响配电网传统方向元件的动作区域, 提出适用于光伏电站并网的配电网系统方向元件动作区域计算方法。以故障时光伏电站输出特征为前提, 对线路不同位置与不同故障类型下保护处正序电压与正序电流的相角关系进行分析, 提出基于正序故障电流和正序故障电压相角差的方向元件动作区域。基于 PSCAD 搭建典型含光伏电站配电网模型, 对各种故障类型及故障位置进行仿真验证, 结果表明所提方法能有效判断故障方向, 且不受故障类型与故障位置的影响。

关键词: 配电网; 光伏电站; 低电压穿越; 方向元件; 动作区域; 序分量

中图分类号: TM 773; TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.004

0 引言

随着并网光伏电站在配电网中的渗透率不断提高, 其单电源辐射形网络变为多端电源供电网络。配电网中传统的三段式电流保护由于受光伏并网的影响会出现误动、拒动等问题^[1-3]。目前为了避免此问题发生, 配电网保护装置大多安装方向元件以提高保护动作的可靠性^[4-5]。

传统的方向元件利用电流、电压之间的相位关系判别故障方向, 最大灵敏角 $\varphi_{\text{sen,max}}$ 的 $\pm 90^\circ$ 范围内为动作区^[6]。光伏电站的输出特性与传统线性电源不同, 其由逆变器控制策略决定^[7]。发生不对称故障时, 传统系统电源输出三相不对称电流, 而光伏电站仍能输出三相对称电流, 由此可知在配电网系统发生故障时, 光伏电站的故障特性与传统电源也不同, 对传统方向元件的动作区域会有一定的影响。

针对此问题, 很多学者做出研究。文献[8]对不同位置故障下的电压变化量情况进行研究, 并以此为基础提出根据电压变化量的幅值大小判断故障方向的方法, 该方法考虑到配电网系统阻抗、线路阻抗和负荷阻抗角度的变化, 但并未考虑到光伏电站的输出具有随机性的特征。文献[9]考虑到配电网中无电压互感器元件, 提出一种只利用电流信息判断故障方向的方法, 其原理为故障支路的电流故障分量模值最大, 但随着光伏电站在配电网中渗透率的提高, 其双端潮流特性会导致判断失误。文献[10-11]利用故障前一周期和后一周期的电流正序分量相角差判定故障方向, 通过比较三相电流绝对值间隔 0.01 s 差分后的最大值和最小值之差来判断故障相别。

本文根据并网光伏电站低电压穿越 LVRT(Low-Voltage Ride-Through)控制策略下的输出特性, 分析发生故障时并网光伏电站对传统方向元件判断的影

响, 并针对光伏电站故障输出特性提出方向元件动作区域新方案, 最后通过实例进行仿真验证。

1 并网光伏电站 LVRT 控制策略

随着光伏电站在配电网中的渗透率不断提高, 为了防止发生故障时光伏电站脱网引起的功率缺额导致相邻电站跳闸, 从而扩大停电面积问题的发生, 国家电网公司要求并网光伏电站在电网故障期间保持一定时间不脱网, 并为电网稳定性提供支撑^[12], 具体 LVRT 能力要求为: 当故障发生直到电压恢复至 0.9 p.u. 期间, 光伏电站输出的无功电流应跟踪并网点电压 u 变化, 且当 $u_{\text{PCC.f}} > 0.9$ 时, $i_{q.f} = 0$; 当 $0.2 \leq u_{\text{PCC.f}} \leq 0.9$ 时, $i_{q.f} \geq 1.5(0.9 - u)$; 当 $u_{\text{PCC.f}} < 0.2$ 时, $i_{q.f} \geq 1.05$ 。其中 $u_{\text{PCC.f}}$ 为并网点电压标幺值, $i_{q.f}$ 为系统发生故障时输出无功电流标幺值。

含光伏电站的配电网发生故障时, 有功、无功电流调整值均提高。根据并网规程的要求, 并网光伏电站的输出无功电流的同时应尽力维持电网的有功功率平衡, 因此应在逆变器允许的过流能力下发出最大有功电流。考虑逆变器过流能力^[13]以及无功电流优先调整的条件下, 有功电流的指令为:

$$I_{df} = \min \left\{ \frac{P_m}{U_{\text{PCC.f}}}, \sqrt{I_{\text{max}}^2 - i_{q.f}^2} \right\} \quad (1)$$

其中, P_m 为光伏电站并网故障前输出有功功率; $U_{\text{PCC.f}}$ 为并网点故障电压实际值; I_{max} 为逆变器允许流过的最大电流; I_{df} 为系统发生故障时输出有功电流实际值。

系统发生故障时, 并网光伏电站输出的故障电流受并网点正序故障电压 $U_{\text{PCC.f}}^+$ 控制, 且有功分量定向于并网点电压相量^[14-15], 因此光伏电站输出故障电流相量 $I_{\text{PV.f}}$ 的大小、相位由 $U_{\text{PCC.f}}^+$ 决定, 其值为:

$$I_{\text{PV.f}} = (I_{df} \cos \gamma + I_{q.f} \sin \gamma) + j(I_{df} \sin \gamma - I_{q.f} \cos \gamma) \quad (2)$$

其中, γ 为 $U_{\text{PCC.f}}^+$ 的相角; $I_{\text{PV.f}}$ 与 $U_{\text{PCC.f}}^+$ 之间的相角差为 $-\arctan(i_{q.f}/i_{df})$ 。

2 LVRT 控制下的并网光伏电站对传统方向元件的影响

传统功率方向继电器的动作方程可表示为:

$$\varphi_{\text{sen,max}} - 90^\circ \leq \arg(U_m/I_m) \leq \varphi_{\text{sen,max}} + 90^\circ \quad (3)$$

其中, U_m, I_m 分别为保护安装处测量电压、电流; $\varphi_{\text{sen,max}}$ 为功率方向继电器的最大灵敏角。

由上述分析可知,并网光伏电站在系统发生故障后,其输出故障电流与电压的夹角范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。为了研究 LVRT 控制下的并网光伏电站对传统方向元件的影响,以图 1 所示含光伏电站的配电网模型为例进行仿真分析。图中,光伏电站接入容量为 10.2 MW;变电站变比为 110 kV/10.5 kV,变压器短路电压为 17%;负荷参数 $S_B=2157.5+j604.1 \text{ kV}\cdot\text{A}$, $S_C=3532.5+j989.1 \text{ kV}\cdot\text{A}$, $S_D=1962+j549.36 \text{ kV}\cdot\text{A}$, $S_E=2147+j601.16 \text{ kV}\cdot\text{A}$, $S_F=4843+j1356.04 \text{ kV}\cdot\text{A}$;系统的等值阻抗 $Z_s=j0.105 \Omega$;线路参数 $Z=0.21+j0.34 \Omega/\text{km}$,线路长度为 $l_{AD}=l_{EF}=0.5 \text{ km}$, $l_{AB}=l_{DE}=1 \text{ km}$, $l_{BC}=2.6 \text{ km}$ 。

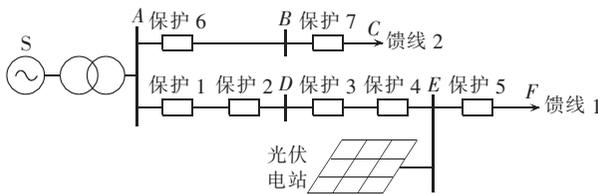


图 1 含光伏电站的配电网模型

Fig.1 Model of distribution network with PV plant

线路阻抗角为 58.30° ,故传统功率方向继电器的最大灵敏角 $\varphi_{\text{sen,max}}$ 取值为 -30° ,则动作方程为:

$$-120^\circ \leq \arg(U_m/I_m) \leq 60^\circ \quad (4)$$

当线路 AD 距母线 A 40% 处发生 BC 相间短路故障时,保护安装处所测相间电压、电流相位差如表 1 所示。

表 1 相间短路故障各保护安装处测得的相间电压与电流相位差

Table 1 Phase-angle difference between phase-voltage and current, measured by different protections during inter-phase short circuit

相位差	保护 1	保护 2	保护 3	保护 4
$\arg \frac{U_{BC}}{I_A} / (^\circ)$	-116.46	-132.57	47.43	74.42
$\arg \frac{U_{CA}}{I_B} / (^\circ)$	-63.25	-112.96	57.04	65.56
$\arg \frac{U_{AB}}{I_C} / (^\circ)$	-4.44	-142.76	37.24	42.59

当线路 AD 发生故障时,保护 1、2、4 为正方向,保护 3 为反方向,根据方向元件的动作方程(见式(4))对表 1 中各保护测量数据进行判断,通过分析可知,表 1 中加粗数据为判断方向错误的的数据。

由上述仿真结果可知,含光伏电站的配电网发生故障时,传统功率方向元件可能会发生误动,其原因是发生不对称故障时光伏电源输出三相对称的正序

电流,使得光伏电源侧线路上无负序压降,在正负序电流、电压叠加时,导致电流和电压的分布特点与传统配电网线路不相同,致使传统功率方向元件不能正确动作。因此,研究适用于具有 LVRT 特点的光伏电站接入配电网的方向元件是十分必要的。

3 方向元件动作范围整定

为了分析含光伏电站的配电网系统发生故障时各保护处 U_m, I_m 的相位关系,即方向元件动作范围的整定,以图 1 所示配电网为例进行分析。由于配电网系统发生故障时,光伏电站等值模型为受并网点正序电压控制的受控电流源模型,故以序分量法分析故障特征时其受控模型仅存在于正序网图中。

设线路 AD、DE、EF、AB、BC 的线路阻抗分别为 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 ,供电系统阻抗为 Z_s ,负荷等效为恒阻抗模型,由于其值远大于线路阻抗故忽略不计。

3.1 系统电源与光伏电站之间发生故障

线路 AD 距离母线 A α 处发生两相短路故障,保护 1 与故障点之间的阻抗为 αZ_1 ,供电系统阻抗为 Z_s ,光伏电站下游等值阻抗为 Z_L ,过渡电阻阻值为 Z_f 。由两相短路故障的边界条件可知故障位置处正、负序电压关系为 $U_1^+ = U_1^-$,系统各序网图如图 2 所示。

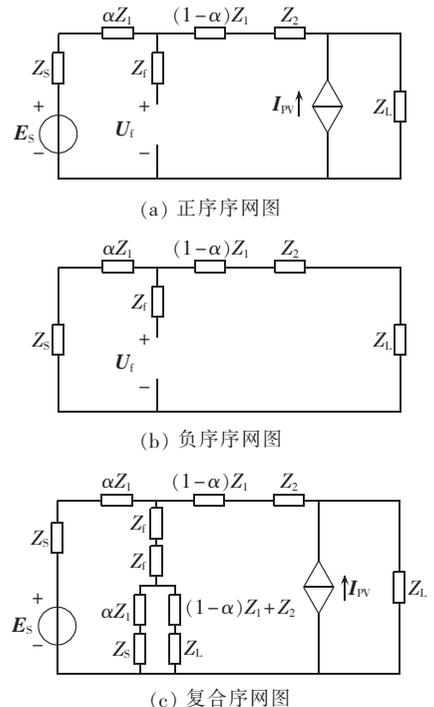


图 2 两相短路故障各序网图

Fig.2 Sequence diagrams of inter-phase short circuit

根据戴维南定理,图 2 可等效为如图 3 所示的等效电路,图中 U_1^+ 为母线 D 处正序电压, U_2^+ 为光伏电站并网点母线 E 处正序电压,等值电源 E_s' 与电源等值阻抗 Z_s' 计算公式为:

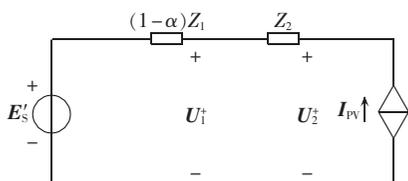


图 3 戴维南等值电路

Fig.3 Thevenin equivalent circuit

$$E_s' = E_s \frac{2Z_f + Z_s + \alpha Z_1}{2Z_f + 2Z_s + 2\alpha Z_1} \quad (5)$$

$$Z_s' = \frac{(2Z_f + Z_s + \alpha Z_1)(Z_s + \alpha Z_1)}{2Z_f + 2Z_s + 2\alpha Z_1} \quad (6)$$

发生故障时,保护 1 处的正序电压为 $E_s'^+$, 保护 2、3 处的正序电压为 U_1^+ , 保护 4 处的正序电压为 U_2^+ , 流经保护 1 的正序故障电流为等值电源输出的正序电流 $I_s'^+$, 流经保护 2、3、4 的正序故障电流为光伏电站的输出电流 I_{PV} 。根据式 (1) — (3), 以并网点电压 U_2^+ 为参考相量, 各电压相量见图 4, 图中 φ_L 为线路阻抗角, β 为 U_1^+ 与 U_2^+ 的夹角, ΔU 为线路阻抗 Z_L 上的压降。

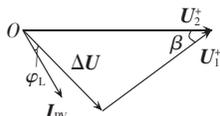


图 4 电压相量图

Fig.4 Voltage phasor chart

由图 4 可知, 各保护电压、电流的夹角与光伏电站输出电流的情况以及线路阻抗角有关。发生故障时, 光伏电站根据并网点电压跌落情况输出的电流包含无功分量与有功分量, 与并网点正序电压 U_2^+ 的夹角 φ_{PV} 的取值范围为 $[-90^\circ, 0^\circ]$, 线路阻抗角 φ_L 的取值范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。为了便于分析发生故障时各保护安装处电压与电流夹角的取值范围, 根据发生故障时光伏电站 LVRT 控制策略, 从光伏电站输出电流只含有功电流与只含无功电流 2 个方面分析。

(1) 光伏电站输出电流仅含无功成分。

光伏电站在并网点电压标幺值跌落至 0.2 p.u. 时, 仅输出无功电流。此时, I_{PV} 与 U_2^+ 的夹角为 90° , I_{PV} 的幅值为:

$$I_{PV} = 1.05 I_N \quad (7)$$

在线路阻抗 Z_2 上压降的幅值为:

$$|\Delta U| = \frac{I_{PV} X_2}{\sin \varphi_L} = \frac{I_{PV} R_2}{\cos \varphi_L} \quad (8)$$

其中, I_N 为额定电流; X_2 、 R_2 分别为线路电抗、电阻。

根据三角形正弦定理, 由图 4 可知 U_1^+ 与 U_2^+ 的夹角 β 为:

$$\sin \beta = \frac{|\Delta U| \sin(90^\circ - \varphi_L)}{|U_1^+|} = \frac{|\Delta U| \cos \varphi_L}{|U_1^+|} \quad (9)$$

因此, I_{PV} 与 U_1^+ 的夹角即保护 2 处正序电压与正序电流的夹角 δ 为:

$$\delta = \beta + 90^\circ \quad (10)$$

由于 $|U_1^+|$ 、 R_2 、 X_2 、 I_{PV} 的定义域为 $(0, +\infty)$, φ_L 的定义域为 $[0^\circ, 90^\circ]$, 通过式 (8) — (10) 计算可知夹角

δ 的定义域为 $[90^\circ, 180^\circ]$ 。

(2) 光伏电站输出电流仅含有功成分。

当并网点电压标幺值在 0.9 p.u. 以上时, 仅输出有功电流。此时, I_{PV} 与 U_2^+ 的夹角为 0° , I_{PV} 的幅值为:

$$I_{PV} = P_m / (u_2^+ U_N) \quad (11)$$

其中, u_2^+ 为并网点正序电压标幺值; U_N 为额定电压。

在线路阻抗 Z_2 上压降的幅值为:

$$|\Delta U| = \frac{I_{PV} X_2}{\sin \varphi_L} = \frac{I_{PV} R_2}{\cos \varphi_L} \quad (12)$$

根据三角形正弦定理, 由图 4 可知 U_1^+ 与 U_2^+ 的夹角 β 为:

$$\sin \beta = \frac{|\Delta U| \sin \varphi_L}{|U_1^+|} \quad (13)$$

因此, I_{PV} 与 U_1^+ 的夹角即保护 2 处正序电压与正序电流的夹角 δ 为:

$$\delta = \beta \quad (14)$$

由于 $|U_1^+|$ 、 R_2 、 X_2 、 P_m 的定义域为 $(0, +\infty)$, φ_L 的定义域为 $[0^\circ, 90^\circ]$, 通过式 (12) — (14) 可知夹角 δ 的定义域为 $[-60^\circ, 0^\circ]$ 。

由上述分析可知, 系统电源与光伏电站之间发生故障时, U_1^+ 与 I_{PV} 的夹角 δ 的定义域为 $[-60^\circ, 180^\circ]$ 。

3.2 光伏电站下游发生故障

当光伏电站下游发生故障时, 以线路 EF 距离母线 E α 处发生三相短路故障为例, 保护 5 与故障点之间的阻抗为 αZ_3 , 故障点下游等值阻抗为 Z_{L1} , 过渡电阻阻值为 Z_{R1} 。系统故障分析图如图 5 所示。

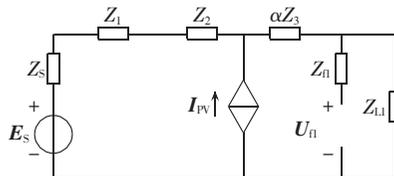


图 5 系统故障分析图

Fig.5 System fault analysis

由于三相短路故障无负序、零序分量, 故 U_2^+ 与 I_{PV} 夹角范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$, 在发生非对称故障时, 由于光伏输出电流仅存在于正序网络中, 根据 LVRT 控制策略 U_2^+ 与 I_{PV} 的夹角范围仍为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。故光伏电站下游发生故障时保护 5 处的正序电压 U_5^+ 与流经保护 5 的正序电流 (即光伏电站输出电流 I_{PV}) 的夹角 δ 的定义域为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。

3.3 方向元件动作区域

由上述分析可知, 为了满足方向元件就地电气信息处理的要求, 电压、电流相位分别采用保护处正序电压 U_m^+ 与正序电流 I_m^+ 的相位。考虑到光伏电站暂态过程对计算结果的影响, 采用故障发生 20 ms 后各分量的计算值作为对应方向元件的参考量。

根据上述分析结果可知, 含光伏电站的配电网中不同安装位置的方向元件的动作区域不同, 从数

学特性上可分为 3 类。

(1) 系统电源出口及光伏电站下游、相邻馈线保护的方向元件动作区域为:

$$0^\circ \leq \arg(U_m^+ / I_m^+) \leq 90^\circ \quad (15)$$

(2) 系统电源侧(除出口处)保护的方向元件动作区域为:

$$-60^\circ \leq \arg(U_m^+ / I_m^+) \leq 180^\circ \quad (16)$$

(3) 光伏电站侧保护的方向元件动作区域为:

$$0^\circ \leq \arg(U_m^+ / I_m^+) \leq 120^\circ \quad (17)$$

综上所述,各方向元件的动作区域与传统方向元件不同,其特点为:由于配电网线路受光伏电站 LVRT 控制策略影响,发生故障时各保护测量的相角与线

路阻抗角无关,因此在计算动作区间时不存在最大灵敏角问题;整定含光伏电站并网的保护方向元件动作区间时不能在最大灵敏角的 $\pm 90^\circ$ 范围内选取;考虑到光伏并网的配电网的输出特性,其配电网方向元件动作区间以各保护处正序电压与电流的相位差值为判断值,保证了方向判断的准确性。

4 仿真实验

基于 PSCAD 搭建图 1 所示的系统模型,通过仿真验证不同线路在不同故障位置发生相间或三相短路故障时各保护流过的正序电流与电压的相位差(见表 2),验证所提方向元件动作区间判断的准确性。

表 2 不同故障条件下各保护测量相位差

Table 2 Phase-angle differences measured by different protections during different faults

故障位置		相角差/(°)									
		保护 1		保护 2		保护 3		保护 4		保护 5	
		相间短路	三相短路	相间短路	三相短路	相间短路	三相短路	相间短路	三相短路	相间短路	三相短路
线路 AD	$\alpha=0$	16.392	0.013	-23.996	-32.261	156.002	147.736	-22.770	-31.313	-16.336	-16.336
	$\alpha=0.5$	56.001	53.766	74.468	158.76	-105.530	-21.241	73.496	86.789	-16.327	-16.394
	$\alpha=1$	56.600	56.054	76.719	139.98	-103.219	-41.855	75.558	70.189	-16.325	-21.262
线路 DE	$\alpha=0$	56.600	56.054	-125.001	-178.247	54.999	1.816	75.558	70.179	-16.325	-21.262
	$\alpha=0.5$	56.303	57.233	-124.335	-123.812	55.665	56.184	77.899	40.431	-16.324	-14.869
	$\alpha=1$	55.563	57.477	-124.960	-122.929	55.040	57.071	79.830	109.024	-16.325	-17.181
线路 EF	$\alpha=0$	55.563	57.744	-124.821	-123.845	54.198	56.774	-121.359	-135.422	54.184	56.926
	$\alpha=0.5$	56.563	56.552	-123.709	-124.127	56.291	55.873	-124.625	-132.555	54.201	53.677
	$\alpha=1$	57.833	56.297	-122.229	-124.342	57.771	55.658	-122.419	-128.977	54.174	55.924

根据式(15)—(17)分析表 2 中各保护相角测量值的方向性,并与理论值相比较判断其正确性。线路 AD 任意位置发生短路故障,保护 1—4 的方向元件理论判断结果分别为正向、正向、反向、正向。将测量结果与各保护方向元件动作区间相比较,保护 1、2、4 均处于正方向动作区域,保护 3 处于反向动作区域,各保护方向判断准确,与理论分析相符合。线路 DE 任意位置发生短路故障,保护 1—4 的方向元件理论判断结果分别为正向、反向、正向、正向。将测量结果与各保护方向元件动作区间相比较,保护 1、3、4 均处于正方向动作区域,保护 2 处于反向动作区域,各保护方向判断准确,与理论分析相符合。线路 EF 任意位置发生短路故障,保护 1—5 的方向元件理论判断结果分别为正向、反向、正向、反向、正向。将测量结果与各保护方向元件动作区间相比较,保护 1、3、5 均处于正方向动作区域,而保护 2、4 处于反向动作区域,各保护方向判断准确,与理论分析相符合。

基于上述仿真实验可知,所提方法能有效判断故障方向,且不受故障类型与故障位置的影响。

5 结论

根据故障时并网光伏电站的输出特性推导方向元件动作区域的整定方案,通过理论推导与仿真验证所得结论如下:

a. 由于故障时光伏电站受 LVRT 控制策略影响,光伏电站的输出电流仅与并网点电压跌落情况有关,并保持三相电流对称输出,从而导致传统的方向元件判断存在动作误区;

b. 由于含光伏电站并网的配电网线路受光伏 LVRT 控制策略影响,发生故障时,各保护 U_m 、 I_m 夹角与线路阻抗角无关,因此在计算动作区间时,不存在最大灵敏角问题;

c. 受并网光伏电站输出特性的影响,方向元件的正反方向动作区域不对称,且与传统方向元件动作区在最大灵敏角度的 $\pm 90^\circ$ 范围内选取不同。

参考文献:

- [1] 郭楠,白丽娜. 光伏电源接入对继电保护及重合闸的影响与建议[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(增刊):138-140.
GUO Nan,BAI Lina. Impact of grid-connected photovoltaic power on relay protection and reclosure together with related suggestions[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2016,28(Supplement): 138-140.
- [2] 李斌,袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):12-17.
LI Bin,YUAN Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose,and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):12-17.
- [3] 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.
- [4] 李蕊, 李跃, 姜臻, 等. 一种能有效满足重要用户高可靠性需求的新型供电系统保护方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊):98-105.
- LI Rui, LI Yue, JIANG Zhen, et al. A new directional element capable of improving the protection performance of important user's power supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(Supplement):98-105.
- [5] 田书, 刘颖, 何金朋. 基于故障分量含 DG 配电网方向保护新原理[J]. 电源技术, 2012, 36(8):1188-1191.
- TIAN Shu, LIU Ying, HE Jinpeng. New theory of direction protection for distribution network containing DG based on fault component[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(8):1188-1191.
- [6] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 4版. 北京:中国电力出版社, 2009:53-62.
- [7] 焦阳, 宋强, 刘文华. 基于改进 MPPT 算法的光伏并网系统控制策略[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12):92-96.
- JIAO Yang, SONG Qiang, LIU Wenhua. Control strategy of grid-connected photovoltaic generation system based on modified MPPT method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12):92-96.
- [8] 丛伟, 田崇稳, 赵义术, 等. 基于电压变化量幅值比较的智能配电网故障方向元件[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15):93-99.
- CONG Wei, TIAN Chongwen, ZHAO Yishu, et al. A fault directional element based on voltage variation amplitude comparison for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15):93-99.
- [9] 贾伟, 张永生, 吴寿山. 用于含分布式电源配电网保护的无电压方向元件研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2):94-97.
- JIA Wei, ZHANG Yongsheng, WU Shoushan. Research on directional element without voltage in distribution network protection with DG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2):94-97.
- [10] 朱玲玲, 李长凯, 张华中, 等. 含分布式电源的配电网方向过流保护[J]. 电网技术, 2009, 33(14):94-98.
- ZHU Lingling, LI Changkai, ZHANG Huazhong, et al. Directional overcurrent protection for distribution systems containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(14):94-98.
- [11] 司新跃, 陈青, 高湛军, 等. 基于电流相角突变量方向的有源配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11):97-103.
- SI Xinyue, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Protection scheme for active distribution system based on directions of current phase angle variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11):97-103.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 光伏发电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [13] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Microgrid protection[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA:IEEE, 2007:1-6.
- [14] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4):555-561.
- PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4):555-561.
- [15] TIMBUS A V. Control strategies for distributed power generation systems operating on faulty grid[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Montreal, Canada:IEEE, 2006:1601-1607.

作者简介:



焦彦军

焦彦军(1963—),男,河北安国人,教授,博士,研究方向为电力系统保护及其控制(E-mail:jiao_yanjun@263.net);

梁宵(1991—),女,吉林四平人,硕士研究生,通信作者,研究方向为电力系统保护及其控制(E-mail:liangxiaohuadian@163.com);

蒋晨阳(1992—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制及电力系统继电保护(E-mail:jey19920415@163.com)。

Directional element action area calculation considering LVRT of grid-connected PV plant

JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: As the grid-connected PV(PhotoVoltaic) plant under LVRT(Low-Voltage Ride-Through) control may influence the action area of traditional directional elements in distribution network, a suitable action area calculation method is proposed. The phase-angle relation between the positive-sequence current and the positive-sequence voltage of protection is analyzed according to the output characteristics of PV plant for different line fault types at different locations and the directional element action area based on the phase-angle difference between positive-sequence fault current and voltage is presented. A PSCAD model of typical distribution network with PV plant is established and simulations are carried out for different fault types at different locations, which show that, immune to fault type and fault location, the proposed method determines the fault direction effectively.

Key words: distribution network; photovoltaic plant; low-voltage ride-through; directional element; action area; sequence component