

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200280

基于 Tanimoto 相似度的光伏场站送出线路纵联保护

胡勇¹, 郑黎明², 贾科², 李怀强¹, 张健康¹

(1. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048; 2. 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: 受逆变器耐流能力及控制响应特性影响, 光伏电源短路电流幅值受限、相角受控, 导致比率式差动保护性能下降, 光伏场站送出线路缺乏有效的主保护原理。为解决该问题, 在分析光伏场站故障特征的基础上, 引入 Tanimoto 相似度刻画光伏场站与同步系统短路电流之间的波形差异。分析了区内、区外故障时相似度系数的变化, 最终构造了基于 Tanimoto 相似度的纵联保护新原理。仿真结果表明该方法能够正确反映区内、区外故障, 适用于光伏场站弱出力场景, 对高阻故障具有良好的识别能力。

关键词: Tanimoto 相似度; 光伏场站; 送出线路; 纵联保护

Pilot protection based on Tanimoto similarity for a photovoltaic station transmission line

HU Yong¹, ZHENG Liming², JIA Ke², LI Huaiqiang¹, ZHANG Jiankang¹

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;

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

Abstract: The short-circuit current amplitude of photovoltaic power supply is limited and the phase angle depends on the control system. It is affected by the tolerance ability of current and response characteristics. As a result, the performance of ratio differential protection is reduced, and the transmission line of a photovoltaic station lacks an effective main protection principle. In order to solve this problem, based on the analysis of the fault characteristics of photovoltaic stations, Tanimoto similarity is introduced to describe the waveform difference between the short-circuit current of photovoltaic stations and a synchronous system. After analyzing the change of similarity coefficient during internal faults and external faults, a novel protection based on Tanimoto similarity is proposed. The simulation results show that the method can correctly reflect the internal faults and external faults. It is suitable for the weak output of a photovoltaic station and has good identification ability for high fault resistance.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGNW0000DKJS1900197).

Key words: Tanimoto similarity; photovoltaic station; transmission line; pilot protection

0 引言

由于我国太阳能富集地区远离负荷中心, 所以大规模光伏场站汇集接入同步系统已经成为太阳能利用的重要方式^[1-3]。送出线路保护不正确动作将对电力设备产生不利影响^[4], 甚至导致同一条线路上的其他场站功率无法外送, 影响范围更大, 传播更广。因此, 研究光伏场站送出线路保护原理至关重要。

光伏场站的全部功率输出都需要通过电力电子换流器^[5-7], 其故障特性完全取决于换流器的耐流能力与响应特性, 因此光伏电源又称为逆变型电源^[8-9]。文献^[10-13]均证明了光伏场站短路电流受限的特征, 使得差动电流与制动电流幅值相近, 进而造成比率式差动保护性能下降。文献^[14]指出逆变型电源短路电流相角由控制系统决定, 当逆变型电源与同步系统的短路容量比为 1:4 时, 比率式差动保护存在拒动风险。

由于受到逆变器谐波特性的影响, 工频相量测量存在误差^[15], 这必然使得基于工频量保护的原理

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGNW0000DKJS 1900197)

存在性能下降的风险。针对传统保护面临的问题, 已有专家学者研究了基于相似度的保护原理。文献[16-17]均指出各种类型的风电场站短路电流与同步机之间存在巨大差异, 并分别利用 Pearson 算法、余弦算法刻画输电线路两侧的波形相似度, 构造了保护原理, 在新能源场站额定工况下具有良好的性能。文献[18]利用 Pearson 相似度系数描述差动电压与差动电流一阶导数是否满足电容模型, 并基于此构造了保护原理。文献[19-20]利用电流相量夹角的余弦值, 判断直流电流极性, 构成了纵联保护原理。然而, 这类方法在光伏场站弱出力时将面临 0/0 型问题, 导致保护原理计算失效。综上所述, 光伏场站送出线路仍缺乏有效的保护原理。

本文分析了光伏电源故障特征, 并利用 Tanimoto 相似度刻画光伏场站与同步系统短路电流之间的波形差异。分析了区内、区外故障以及光伏场站弱出力场景下波形相似度变化规律, 提出了基于 Tanimoto 相似度的光伏场站送出线路纵联保护原理。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了光伏场站集中式并网系统, 在不同故障位置、不同故障类型、不同过渡电阻等故障场景下分别进行了仿真, 验证了所提保护原理的有效性。与现有的相似度保护原理进行了对比, 验证了所提方法在光伏场站弱出力时具有更好的性能。

1 光伏电源故障特征分析

光伏电源通过逆变器并网, 其并网系统拓扑及控制系统结构如图 1 所示。由于光伏电源的功率输出全部依赖逆变器进行, 短路电流的特征完全由逆变器控制响应特性决定。

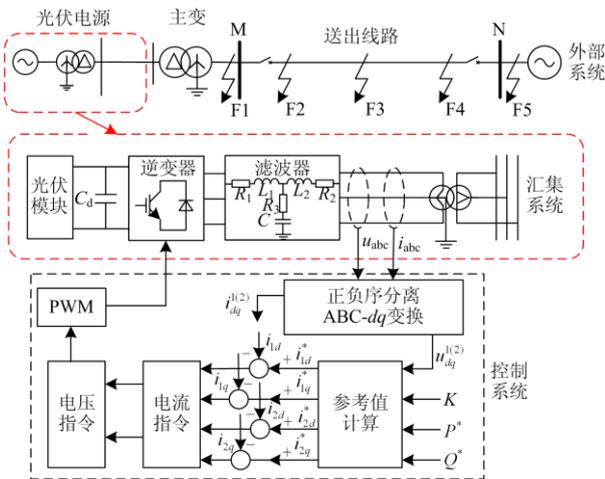


图 1 光伏电源并网拓扑图

Fig. 1 Structure of the integrated photovoltaic station

一般情况下, 光伏逆变器采用正、负序分离控制, 为了防止电力电子设备过流, 在故障穿越过程中采用抑制负序电流控制。结合控制结构及低电压穿越控制策略可以推导其暂态短路电流的解析表达式为^[21]

$$i_{\phi-PV} = \frac{2P}{3u_d} \cos(\omega t + \theta_{\phi}) - i_q^* \sin(\omega t + \theta_{\phi}) + (i_{d0} - \frac{2P}{3u_d}) \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \alpha) \cdot \cos(\omega t + \theta_{\phi}) + i_q^* e^{-(k_p/2L)} \frac{2\sqrt{Lk_{ii}}}{\sqrt{4k_{ii}L - k_{ip}^2}} \sin(\frac{\sqrt{4k_{ii}L - k_{ip}^2}}{2L} t + \beta) \sin(\omega t + \theta_{\phi}) \quad (1)$$

式中: $i_{\phi-PV}$ 代表光伏电源的故障相电流; P 为逆变器型电源输出的功率; u_d 为 d 轴电压; ω 为锁相环检测到的角频率; θ_{ϕ} 代表故障后的初相角; i_{d0} 为故障前 d 轴电流初始值; i_q^* 为代表 q 轴电流参考值; k_{ip} 、 k_{ii} 分别为电流控制环的比例常数与积分常数; L 为等效电感; ξ 为阻尼比, $\xi = k_{vp} \sqrt{3u_d} / 2\sqrt{2Cu_{dc}^* k_{vi}}$, 其中, u_{dc}^* 为直流母线电压参考值, k_{vp} 、 k_{vi} 分别代表电压控制环比例常数与积分常数; ω_d 为阻尼振荡频率, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$, 其中, $\omega_n = \sqrt{3k_{vi} u_d / 2Cu_{dc}^*}$; α 为 d 轴阻尼角; β 为 q 轴阻尼角。

根据式(1)可知, 光伏电源所提供的短路电流仅含正序电流, 且受到 dq 轴电流参考值限制, 短路电流幅值受限, 仅为额定电流的 2~3 倍。

另一方面, 由于锁相环(PLL)同样存在动态响应过程, 故式(1)中角频率 ω 将偏离工频角频率, 因此光伏电源所提供的故障电流呈现幅值受限的非工频特性。

图 1 中送出线路发生区内相间故障时, 由于不存在零序回路且光伏电源抑制负序电流, 所以 M 侧保护装置只检测到光伏电源提供的正序电流。而同步系统提供的短路电流包含正序电流和负序电流, 两侧电流存在巨大差异。

送出线路发生区内接地故障时, M 侧短路电流将包含光伏电源提供的正序分量以及零序电流, 而 N 侧短路电流包含正序分量、负序分量和零序分量。两侧短路电流存在明显的不同。

综上所述, 光伏场站侧的短路电流与同步系统短路电流存在巨大的差异。故本文利用这种差异构造保护原理。

2 基于 Tanimoto 相似度的纵联保护

2.1 Tanimoto 相似度原理

Tanimoto 相似度经常用于度量两组数据的差异。若 x 和 y 为两个 N 维向量, 那么 Tanimoto 相似度计算公式为

$$\tau(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N x_k \cdot y_k}{\sum_{k=1}^N x_k^2 + \sum_{k=1}^N y_k^2 - \sum_{k=1}^N x_k \cdot y_k} \quad (2)$$

式中, x 和 y 分别为两个 N 维向量, 其中 x_k 和 y_k 取值范围为 $[0,1]$ 。

根据式(2)可知, 当 x 与 y 不是零向量, 且 $x = y$ 时, $\tau(x, y) = 1$ 。根据式(3)可知, 当 x 与 y 不是零向量, 且 $x \neq y$ 时, 由不等式原理可知 $\tau(x, y) < 1$ 。当 x 与 y 其中有一个为零向量时, $\tau(x, y) = 0$ 。

$$\tau(x, y) \leq \frac{\sum_{k=1}^N x_k \cdot y_k}{2 \sum_{k=1}^N x_k \cdot y_k - \sum_{k=1}^N x_k \cdot y_k} = 1 \quad (3)$$

与现有的基于 Pearson、余弦相似度的保护(式(4)所示)相比, Tanimoto 相似度最大的优势为可以计算一侧数据全为 0 时的相似度。

$$\left\{ \begin{aligned} \cos(x, y) &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \\ \text{pear}(x, y) &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j)(y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j)^2}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: $\cos(x, y)$ 为余弦相似度计算公式; $\text{pear}(x, y)$ 为 Pearson 相似度计算公式。

根据式(4)可知, 余弦相似度与 Pearson 相似度的分子与分母均为乘积形式, 故当 x 或 y 其中一组数据全为 0 时, 出现 0/0 型计算式, 导致保护无法正确动作。而 Tanimoto 相似度的分母使用加、减形式构造, 在其中一组数据为 0 时, 仍然可以正确计算。

2.2 保护判据

保护装置按照固定的采样频率进行采样, 假设 M 侧保护装置一段时间窗内标幺化电流采样值为 $i_m = \{i_{m1}, i_{m2}, \dots, i_{mN}\}$; N 侧保护装置一段时间窗内标幺化电流采样值为 $i_n = \{i_{n1}, i_{n2}, \dots, i_{nN}\}$, 则

$$\tau(i_m, i_n) = \frac{\sum_{k=1}^N |i_{mk}| \cdot |i_{nk}|}{\sum_{k=1}^N i_{mk}^2 + \sum_{k=1}^N i_{nk}^2 - \sum_{k=1}^N |i_{mk}| \cdot |i_{nk}|} < \tau_{\text{set}} \quad (5)$$

式中: N 为一段时间窗内的采样点总数; $|\cdot|$ 表示取绝对值, 由于电流采样值已经标幺化处理, 所以取绝对值后, 数值范围在 $[0,1]$ 之间。

发生区内故障时, 根据第 1 节的分析, M 侧与 N 侧短路电流波形不同, Tanimoto 相似度计算值小于 1。而发生区外故障时, 短路电流穿过整条送出线路, M 侧与 N 侧保护装置检测到相同的短路电流, 故相似度计算值趋近于 1。利用这种特征可以构造保护原理, 当区内故障发生时, 故障相的相似度计算值小于整定值 τ_{set} , 保护动作以切除故障。

2.3 保护整定及算法实现

保护定值 τ_{set} 整定原则为躲过 CT 传变误差。与传统保护不同的是, 根据 2.2 节的分析, 定值以 1 为基准设定, 如式(6)所示。

$$\tau_{\text{set}} = 1 \cdot K_{\text{mag}} \cdot K_{\text{mar}} \quad (6)$$

式中: K_{mag} 为幅值可靠系数; K_{mar} 为裕度系数。

根据上述误差的最大可能值并留有一定的裕度, 选取幅值可靠系数为 0.95、裕度可靠系数为 0.95, 计算得到相似度定值为 0.90。

所提保护的流程图如图 2 所示。当故障发生后, 电流突变量元件启动, 保护装置采样本侧数据并向对侧传输采样数据, 经过标幺化处理及取幅值后, 进行相似度计算, 并实时判断故障位置及故障类型。当相似度计算值小于设定值时, 保护装置发出跳闸信号, 切除故障; 当相似度计算值大于等于设定值时, 保护复归。

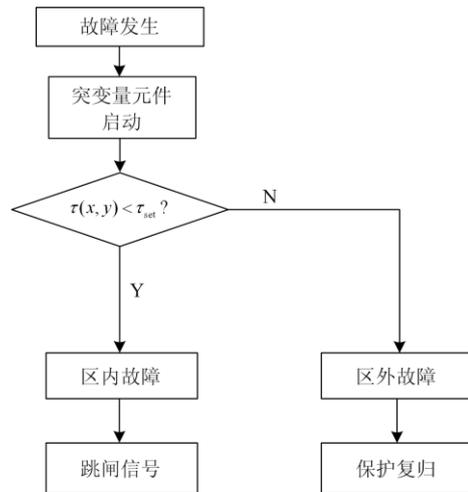


图 2 保护算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the proposed protection algorithm

3 仿真验证

根据西北电网哈密地区规模化光伏场站并网实际拓扑及参数, 在 PSCAD/EMTDC 中建立如图 1 所示的光伏电源并网系统, 以验证所提保护的性能。单个光伏模块容量设置为 1 MW, 共 100 个模块。光伏场站通过 35 kV/220 kV 的变压器连接至外部系统, 光伏并网模型详细参数见附录表 A1。故障点分别设置在区外(F1 和 F5)、区内近端(F2 和 F4)以及线路中点(F3)处。故障类型分别为单相接地(AG)、两相相间(BC)、两相短路接地(BCG)、三相故障(ABC)。采样频率为 1 kHz, 相似度保护数据窗长选为 10 ms。

3.1 区内故障与区外故障

以区内 F3 处故障为例, 故障发生时间设置为 0.8 s, 故障持续时间 200 ms。分析了四种类型故障下, 所提相似度保护原理的动态性能, 如图 3 所示。

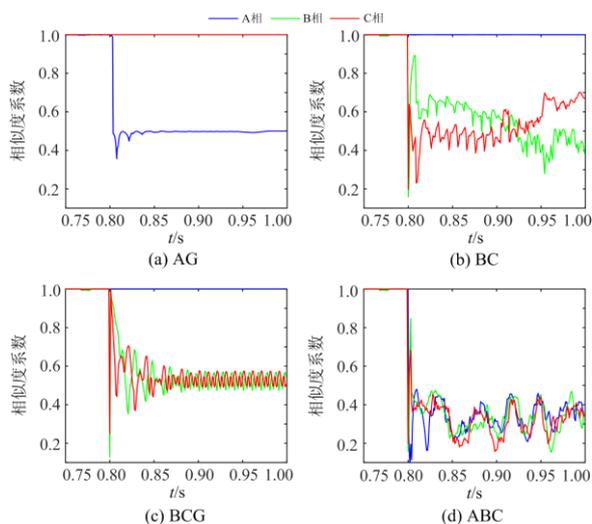


图 3 所提保护动态性能

Fig. 3 Dynamic performance of the proposed protection

由图 3 可知, 在正常运行时, 由于两侧电流波形相同, 相似度系数计算值为 1, 这与第 2 节的分析一致。而在发生故障后, 由于 M 侧与 N 侧保护装置检测到的电流波形不同, 导致相似度系数小于 1, 在故障后约 20~30 ms 相似度系数趋于稳定。所提保护原理可以快速、可靠地反映故障。

表 1 列出了不同故障位置及故障类型场景下相似度系数的计算值, 表中数值取自故障后 20 ms 处。

表 1 中, F1 和 F5 处发生故障时, M 侧与 N 侧保护装置测量的电流相同, 故相似度系数趋近于 1, 突变量元件启动后, 由于不满足判据式(5), 保护复归。而在 F2、F3、F4 处发生故障时, 故障相的相似度系数计算值小于整定值, 保护能够可靠地区分

区内、区外故障, 可见具有良好的性能。

表 1 不同故障位置及故障类型场景下保护性能

Table 1 Protection performance under different fault location and fault type scenarios

故障位置	故障类型	相似度系数计算值		
		A 相	B 相	C 相
F1(区外)	AG	1.000	1.000	0.995
	BC	0.998	0.981	0.993
	BCG	1.000	0.991	0.999
	ABC	0.991	1.000	0.993
F2(区内)	AG	0.513	1.000	0.999
	BC	0.998	0.500	0.444
	BCG	0.997	0.363	0.386
F3(区内)	ABC	0.366	0.451	0.402
	AG	0.560	0.956	0.993
	BC	0.996	0.639	0.471
F4(区内)	BCG	0.992	0.344	0.402
	ABC	0.401	0.383	0.392
	AG	0.520	0.999	0.996
F5(区外)	BC	0.999	0.524	0.400
	BCG	1.000	0.313	0.490
	ABC	0.357	0.412	0.398
	AG	0.999	1.000	1.000
	BC	0.999	0.989	0.998
	BCG	1.000	0.990	0.999
	ABC	1.000	1.000	1.000

3.2 不同过渡电阻场景下的保护性能

单相接地故障往往会存在过渡电阻, 所以必须检验经过渡电阻短路时保护的性能。考虑到 220 kV 输电线路最大过渡电阻为 100 Ω 左右^[22], 所以设置过渡电阻分别为 25 Ω 、50 Ω 、75 Ω 、100 Ω 。以 F3 处发生 A 相接地故障为例进行分析, 表 2 给出了不同过渡电阻场景下所提保护的相似度计算值。

表 2 不同过渡电阻场景下保护性能

Table 2 Protection performance under different transition resistance scenarios

故障类型	过渡电阻/ Ω	相似度系数计算值		
		A 相	B 相	C 相
AG	25	0.599	0.976	0.969
	50	0.612	0.985	0.981
	75	0.667	0.991	0.995
	100	0.692	0.997	0.999

由表 2 可知, 过渡电阻不会影响两侧电源的故障特征, 两侧电流 A 相的相似度系数计算值小于整定值 0.9, 所提保护原理在高阻故障情况下仍然能够正确动作。

3.3 不同功率输出下的保护性能

受天气条件影响, 光伏场站不能时刻保证额定

功率输出^[23]。尤其是在天气较差时,光伏场站几乎不能向外提供功率。设置场站出力为 0 MW、50 MW、100 MW,故障位置设置为 F3,分别验证不同故障类型下,所提相似度保护原理的动作性能。表 3 中展示了光伏场站不同出力场景下所提保护相似度计算值。

表 3 不同功率输出下的保护性能

功率输出/ MW	故障类型	相似度系数计算值		
		A 相	B 相	C 相
1	AG	0.599	0.999	0.998
	BC	0.960	0.012	0.087
	BCG	0.954	0.132	0.035
	ABC	0.011	0.076	0.100
50	AG	0.521	0.996	0.992
	BC	1.000	0.225	0.274
	BCG	0.994	0.301	0.229
	ABC	0.355	0.367	0.402
100	AG	0.560	0.956	0.993
	BC	0.996	0.639	0.471
	BCG	0.992	0.344	0.402
	ABC	0.401	0.383	0.392

由表 3 可知,在不同的功率输出情况下,保护原理均能够可靠反映故障。在光伏场站弱出力时(功率输出为 1 MW),相似度系数值趋近于 0,这符合第 2 节分析。

3.4 与现有相似度保护原理的对比

现有波形相似度原理保护,主要利用 Pearson 系数或余弦相似度对两种波形的相似度进行刻画。在光伏场站输出为 0 时,根据式(4)可知,现有的波形相似度原理存在 0/0 问题,导致保护失效。而本文所提方法在此种情况下仍然可以正确识别故障,具有更好的性能。在光伏场站弱出力时,所提保护与现有原理的对比见表 4。

表 4 保护性能对比

输出功率	故障类型	相似度方法		
		余弦法	Pearson 法	本文方法
1 MW	AG	0/0	0/0	0.015
	BC	0/0	0/0	0.024
	BCG	0/0	0/0	0.011
	ABC	0/0	0/0	0.001

4 结论

1) 针对传统保护在光伏场站接入后出现的问题,本文提出了基于 Tanimoto 相似度的保护原理,并在各种故障场景下显示出良好的性能。

2) 与现有的相似度保护原理进行了对比,结果

显示所提保护在光伏场站弱出力场景下仍能正确反映故障,所提原理具有工程应用潜力。

附录

表 A1 光伏并网模型参数

Table A1 Parameters of photovoltaic grid-connected model

电源类型	参数名称	数值
光伏电源	额定容量	1 MW
	直流电容	5 000 μ F
	LCL 滤波器参数	1.1 mH/200 μ F/124 μ H
	模块数	100
	逆变器电压环 PI 参数	0.9 p.u./0.025 p.u.
	逆变器电流环 PI 参数	0.45 p.u./0.003 p.u.

参考文献

- [1] 高晓帆, 田书, 常永强. 一种新的大型光伏并网系统稳定性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 26-32. GAO Xiaofan, TIAN Shu, CHANG Yongqiang. A novel stability analysis method for large-scale photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 26-32.
- [2] 孙铭爽, 贾祺, 张善峰, 等. 面向机电暂态分析的光伏发电参与电网频率调节控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 28-37. SUN Mingshuang, JIA Qi, ZHANG Shanfeng, et al. Single-stage grid-connected photovoltaic generation takes part in grid frequency regulation for electromechanical transient analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 28-37.
- [3] WANG D, YUAN X, ZHAO M, et al. Impact of large-scale photovoltaic generation integration structure on static voltage stability in China's Qinghai province network[J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 671-675.
- [4] ZHANG Fan, MU Longhua. New protection scheme for internal fault of multi-microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 159-170. DOI: 10.1186/s41601-019-0127-3.
- [5] YU Y, KONSTANTINOU G, TOWNSEND C D, et al. Delta-connected cascaded H-Bridge multilevel converters for large-scale photovoltaic grid integration[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8877-8886.
- [6] BULLICH-MASSAGUÉ E, FERRER-SAN-JOSÉ R, ARAGÜÉS-PEÑALBA M, et al. Power plant control in large-scale photovoltaic plants: design, implementation and validation in a 9.4 MW photovoltaic plant[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(1): 50-62.
- [7] TAFTI H D, TOWNSEND C D, KONSTANTINOU G, et al. A multi-mode flexible power point tracking algorithm for photovoltaic power plants[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5038-5042.
- [8] HAMROUNI N, JRAIDI M, YOUNSI S, et al. Current

- control for inverter-interfaced grid-connected photovoltaic generator[C] // 2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, March 25-28, 2012, Yasmine Hammamet, Tunisia: 296-299.
- [9] LIU S, LIU P X, WANG X. Stability analysis of grid-interfacing inverter control in distribution systems with multiple photovoltaic-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7339-7348.
- [10] 徐可寒, 张哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 359-371.
XU Kehan, ZHANG Zhe, LIU Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 359-371.
- [11] 邵庆祝, 杨畅, 谢民, 等. 基于 RTDS 的光伏接入配电网故障特征研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 1-8.
SHAO Qingzhu, YANG Chang, XIE Min, et al. Research on fault characteristics of distributed photovoltaic system in distributed network based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 1-8.
- [12] 王书征, 李先允, 许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 84-91.
WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 84-91.
- [13] 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.
- [14] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 100-105.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105.
- [15] LIU Hao, LI Jue, LI Jiaxian, et al. Synchronised measurement devices for power systems with high penetration of inverter-based renewable power generators[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(1): 40-48.
- [16] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6275.
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [17] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.
- [18] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585.
SONG Guobing, WANG Chenqing, TANG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.
- [19] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3832.
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3832.
- [20] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 165-171.
ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 165-171.
- [21] CHANG Z, SONG G, WANG T. Analysis on current characteristics of PMSG under grid three-phase fault[J]. The Journal of Engineering, 2018(15): 785-790.
- [22] 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, 2010.
- [23] 王振浩, 康佳, 裴哲义, 等. 基于多权重混合分布模型的光伏出力波动特性研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 278-287.
WANG Zhenhao, KANG Jia, PEI Zheyi, et al. Study on fluctuation characteristics of PV power output based on multi-weight mixed distribution model[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(6): 278-287.

收稿日期: 2020-03-18; 修回日期: 2020-05-11

作者简介:

胡勇(1975—), 男, 高级工程师, 从事继电保护运行管理工作; E-mail: huy0426@sina.com

郑黎明(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源电力系统保护与控制; E-mail: 771501846@qq.com

贾科(1986—), 男, 通信作者, 博士生导师, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制、新型配电网保护与故障定位。E-mail: ke.jia@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)