

DOI: 10.7667/PSPC152217

基于 LIBSVM 识别并网 PV 系统阻抗的输电线 电流保护自适应策略研究

孟龙¹, 刘清贵², 晁勤¹, 王一波¹, 李育强¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网自贡供电公司, 四川 自贡 643000)

摘要: 为解决并入配电网的光伏系统功率波动性导致输电线电流保护拒/误动问题, 提出一种基于 LIBSVM 的 PV 并网系统输电线电流保护自适应策略。基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了结合低电压穿越控制策略模型的并网光伏系统动态仿真模型。在不同故障位置与故障类型情况下, 针对正常运行时光伏功率的波动输出, 仿真分析了光伏系统与低电压穿越控制策略协调下的故障特性及对配电网输电线电流保护产生的影响。在此基础上提出了一种基于支持向量机(SVM)识别 PV 并网系统不同输出功率时等效阻抗的方法, 制定了输电线电流自适应保护判据, 依据光伏系统输出功率和运行方式变化动态调整整定值。仿真验证表明: 所提出的自适应保护策略避免了保护拒/误动, 提高了保护装置性能。

关键词: 并网光伏; 低电压穿越控制策略模型; 故障特性; 电流保护影响; 自适应保护判据

Research on adaptive strategy for overcurrent protection based on identifying the equivalent impedance of grid-connected PV system by LIBSVM

MENG Long¹, LIU Qinggui², CHAO Qin¹, WANG Yibo¹, LI Yuqiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;
2. State Grid Zigong Power Supply Company, Zigong 643000, China)

Abstract: To solve the problem refusal/incorrect tripping of overcurrent protection caused by power fluctuations of the distribution grid-connected photovoltaic (PV) system, this paper proposes an adaptive strategy based on the LIBSVM for overcurrent protection. The PV system dynamic model which combines with low voltage ride through (LVRT) control strategy is built on the platform of Matlab/Simulink. It also simulates and analyses the characteristics of the short-circuit and the influence on overcurrent protection with the different fault at different locations during the normal operation of PV power output fluctuations. A method is proposed to identify equivalent impedance of the grid-connected PV system during different output based on support vector machines (SVM), a line current adaptive protection criterion is developed, which dynamically adjusts the setting value under the PV system output power and operating modes. The simulation shows that the adaptive strategy can avoid the problem refusal/incorrect tripping of overcurrent protection and improve protection's performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367017) and International S&T Cooperation Program of China (ISTCP) (No. 2013DFG61520).

Key words: grid-connected PV; LVRT control strategy; characteristics of the short-circuit; influence on overcurrent protection; adaptive protection criterion

0 引言

光伏发电(Photovoltaic, PV)在利好政策的引导

下发展迅猛。但光伏出力具有间歇、随机、波动的特性, 光伏电源的接入还会导致电网结构复杂化, 潮流和故障特性变化, 进而改变故障电流的方向、大小和持续时间, 降低原有保护装置的各项性能, 甚至引发保护误动、拒动, 给电网带来极大隐患。所以针对 PV 系统接入对配电网原有保护装置造成

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51367017); 科技部国家国际科技合作专项资助(2013DFG61520)

的影响及解决措施的研究具有重要意义。

文献[1-5]在不同仿真平台上搭建了并网光伏系统的模型；文献[6-8]对比分析了多种 MPPT 实现方法的优劣，对光伏 MPPT 启动过程中的采样误差问题提出了改进方案；文献[9]基于实时数字仿真器研究了光伏并网逆变器在三相电压对称跌落下的低电压穿越(LVRT)控制策略；文献[10]提出一种基于超级电容的 PV 并网 LVRT 控制策略。但是针对 PV 系统故障特性，搭建结合 LVRT 控制策略的详细并网 PV 系统暂态模型的文献较少。文献[11-13] 研究分析了 PV 系统的故障特性及对线路电流保护、重合闸装置带来的不利影响，提出了解决方案；文献[14]提出在分布式电源的接入线路上安装故障限流器来保证原有保护的灵敏性与选择性。但是针对 PV 系统接入配电网，综合考虑 PV 输出功率、运行方式、故障类型、逆变器控制策略、LVRT 控制策略，对比研究 PV 系统故障特性并提出解决方案的文献较少，值得深入探讨。

本文在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建了基于卸荷电路和无功电流优先控制的并网 PV 系统 LVRT 控制策略模型，结合多晶硅组光伏阵列模型、采用变步长扰动观测法的 MPPT 控制策略模型、基于 dq 分解法解耦控制的逆变器模型，对并网 PV 系统故障特性及其对配电网输电线电流保护的影响进行仿真分析，提出了一种基于支持向量机(Support Vector Machines, SVM)智能算法的输电线电流保护自适应策略。

1 并网 PV 系统低电压穿越控制策略模型构建方法

并网 PV 系统主要包括光伏阵列、并网逆变器、滤波器，其拓扑结构如图 1 所示。并网逆变器主功率回路主体是三相逆变桥和滤波器，本文在逆变器控制回路中兼顾 MPPT 控制策略，采用直流电压控制与电流环控制方法，考虑故障时低电压穿越性能，基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了包含低电压穿越控制策略的并网 PV 系统暂态仿真模型。鉴于 MPPT 控制策略和直流电压及电流环控制策略已经很成熟，其模型搭建方法本文略。

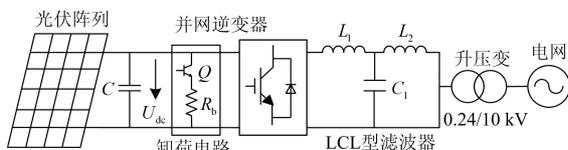


图 1 并网 PV 系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of grid-connected PV system

本文按照国际标准(德国)在逆变器直流侧加装由卸荷电阻和功率元件组成的卸荷保护电路，采用无功优先控制法，构建了低电压穿越控制策略。

1.1 直流侧卸荷保护电路控制模型

在逆变器直流侧加装由卸荷电阻和功率元件组成的卸荷保护电路，抑制直流侧电压升高，维持其稳定，控制框图如图 2 所示。

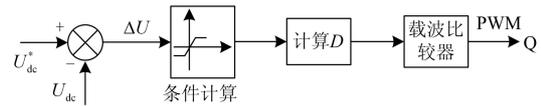


图 2 直流侧卸荷保护电路控制框图

Fig. 2 Control block of unloading protection circuit on DC side

1.2 无功电流优先控制模型

德国光伏并网标准要求：并网点电压跌至 0.9 p.u.以下时，电压每跌落 1%，PV 系统无功电流至少增加 2%。为保证电网故障时 PV 系统能够在并网点电压跌落时向电网提供无功支持，故障时采用无功优先控制法对逆变器电流内环直接控制。即在逆变器电流内环中增加无功电流控制环节，如图 3 所示。

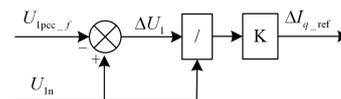


图 3 故障时无功电流优先控制模型

Fig. 3 Reactive current priority control model

1.3 故障穿越时光伏逆变器暂态控制整体模型

基于直流侧卸荷保护电路和无功电流优先控制的并网 PV 系统 LVRT 控制策略流程如图 4 所示。

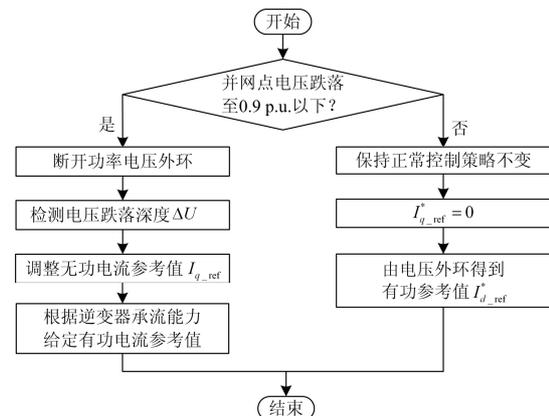


图 4 并网 PV 系统 LVRT 控制策略流程图

Fig. 4 LVRT control flowchart of grid-connected PV system

综合低电压穿越控制策略、MPPT 控制策略、直流电压及电流环控制策略的光伏逆变器暂态控制整体模型如图 5 所示。

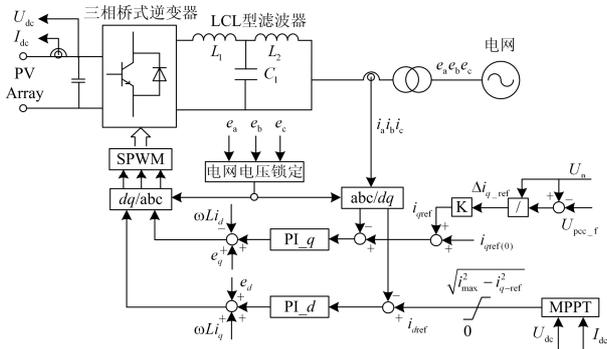


图 5 故障穿越时光伏逆变器暂态控制模型结构图

Fig. 5 Photovoltaic inverter transient control model structure diagram during the LVRT

2 PV 系统故障特性与输电线电流保护影响机理分析

在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建含 PV 系统的配电网，结构如图 6 所示。

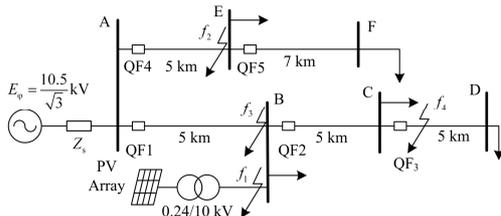


图 6 含 PV 系统配网结构图

Fig. 6 Distribution grid configuration diagram with PV system

系统基准容量 $S_B = 100 \text{ MVA}$ ，基准电压 $U_B = 10.5 \text{ kV}$ ； E_s 表示系统等值电势， $Z_{s_min} = j0.91 \Omega$ ， $Z_{s_max} = j1.16 \Omega$ ； Z_A 、 Z_B 为线路等值阻抗，线路阻抗为 $0.27 + j0.393 \Omega/\text{km}$ ；光伏额定容量为 5 MW 。MPPT 算法功率步长 $\Delta P = 10 \text{ kW}$ ，参考电压 $\Delta V = 1.0 \text{ V}$ 。

2.1 PV 系统不同类型故障特性分析

2.1.1 对称故障

$P = 0.1 \text{ p.u.}$ ， $\cos \varphi = 1$ ， $t = 0.5 \text{ s}$ 时在 f_1 点发生三相短路故障，过渡电阻为 0.4Ω 。PV 系统输出三相电流、A 相电流、输出功率如图 7—图 9 所示。

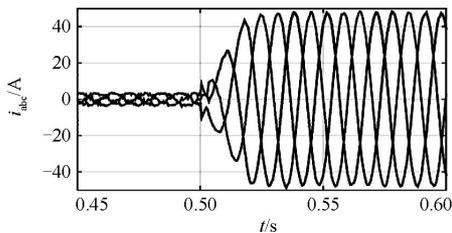


图 7 三相短路时 PV 系统输出三相电流

Fig. 7 Three-phase current of PV during three-phase short circuit

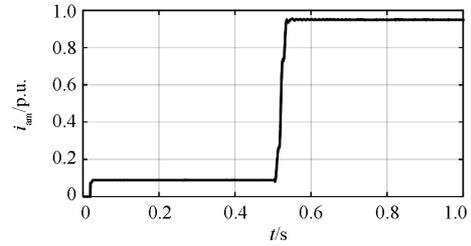


图 8 三相短路时 PV 系统 A 相电流

Fig. 8 A phase current of PV during three-phase short circuit

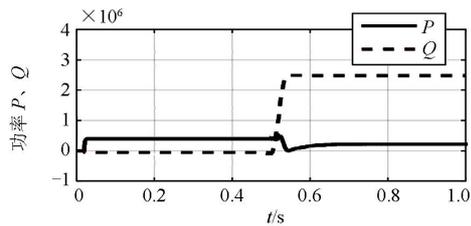


图 9 三相短路时 PV 系统输出功率

Fig. 9 Output of PV during three-phase short circuit

由图 7、图 8 知，电网侧故障时，PV 系统输出电流明显增大，其幅值从 0.1 p.u. 增大至 0.935 p.u. ，但并未超过最大允许值 1.2 p.u. 。由图 9 知，故障期间 PV 系统持续输出无功电流，提供无功支持。

2.1.2 不对称故障

$P = 0.1 \text{ p.u.}$ ， $\cos \varphi = 1$ ， $t = 0.5 \text{ s}$ 时在 f_1 点发生两相短路故障，过渡电阻为 0.1Ω 。PV 系统输出三相电流、功率如图 10—图 12 所示。

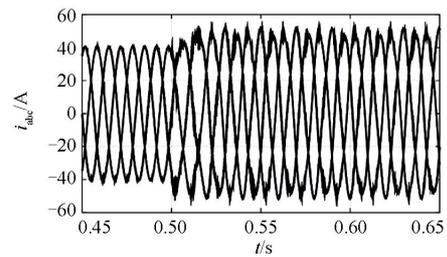


图 10 两相短路时 PV 系统输出三相电流

Fig. 10 Three-phase current of PV during two-phase short circuit

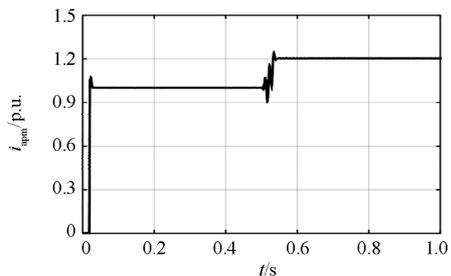


图 11 两相短路时 PV 系统 A 相电流

Fig. 11 A phase current of PV during two-phase short circuit

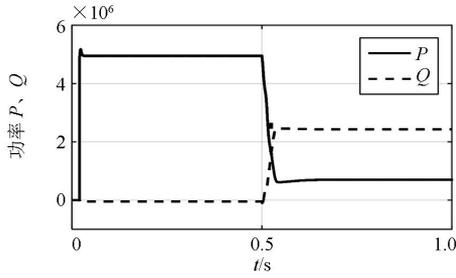


图 12 两相短路时 PV 系统输出功率

Fig. 12 Output of PV during two-phase short circuit

由图 10 知,电网侧故障时锁相环能锁定电网电压相位,经过短暂调节后,光伏系统仍输出对称电流,其余特性与发生对称故障时一致。

仿真表明, PV 系统故障特性与常规电源不同:逆变器输出的故障电流总小于 1.2 p.u.,远小于同等情况下火电的故障电流;对称故障和不对称故障情况下,故障均是三相对称的,由此证明无功优先控制策略的正确性,其短路电流持续时间大于 0.5 s 以上,满足低电压穿越要求。

2.2 PV 输出功率变化及故障位置不同对配电网输电线保护影响分析

PV 系统不接入配电网时,图 6 中输电线保护装置采用三段式电流保护,主保护电流速断可靠系数 $K_{rel}^I = 1.2$,后备保护限时速断可靠系数 $K_{rel}^{II} = 1.1$,整定值如表 1。

表 1 无 PV 接入时电流保护整定值

kA		
保护装置	I 段	II 段
QF1	2.530	1.653
QF2	1.503	1.176
QF3	1.069	—

2.2.1 故障位于 PV 接入点相邻馈线

f_2 点故障时, PV 系统经线路 AB 向故障点提供电流, QF1 上流过反向电流, PV 容量足够大时可能导致 QF1 反向启动,属于误动。

2.2.2 故障位于 PV 接入点上游馈线

线路 AB 末端 f_3 点发生两相短路故障时,不同 PV 输出功率下流过保护 QF1 的故障电流如表 2。

PV 接入导致故障时 f_3 点残压升高,系统电源经 QF1 向 f_3 点输出的短路电流比无 PV 接入时减小了。并且随 PV 输出功率的增大,短路电流持续减小,当 PV 输出功率达到 5 MW 时,流过 QF1 的故障相短路电流为

$$I_{f3_5MVA} = 1.649 \text{ kA} < I_{set_QF1}^{II} = 1.653 \text{ kA}$$

此时 QF1 限时速断电流保护(II 段)不启动(拒动),故障可能无法消除。

表 2 不同 PV 输出功率 f_3 点两相短路流过 QF1 故障电流

Table 2 Short current of QF1 on different output of PV system during two-phase short circuit at f_3

kA		
PV 输出功率/MW	故障相电流	非故障相电流
0	1.823	0.166
1	1.784	0.238
3	1.717	0.494
5	1.649	0.623

2.2.3 故障位于 PV 接入点下游馈线

线路 CD 首端 f_4 点发生三相短路接地故障时,不同 PV 输出功率下流过保护 QF1、QF2、QF3 的故障电流如表 3。

表 3 不同 PV 输出功率 f_4 点三相短路故障电流

Table 3 Short current on different output of PV system during three-phase short circuit at f_4

PV 输出功率/MW	短路电流		
	QF1	QF2	QF3
0	1.253	1.253	1.253
1	1.197	1.316	1.316
3	1.076	1.429	1.429
5	0.944	1.527	1.527

随 PV 输出功率增大,流过保护 QF1 的故障电流减小,后备保护灵敏度降低;流过保护 QF2 的故障电流增大,灵敏度上升,但当 PV 容量达到 5 MW 时,流过 QF2 的故障电流为

$$I_{f4_5MVA} = 1.527 \text{ kA} > I_{set_QF2}^I = 1.503 \text{ kA}$$

此时 QF2 速断电流保护(I 段)失去选择性,误动跳闸。

3 基于 LIBSVM 的输电线电流保护自适应策略

3.1 LIBSVM 简介

支持向量机(SVM)是一种从线性可分情况下的最优分类面发展而来的机器学习算法。非线性情况下,在最优分类面上采用适当的内积函数 $K(x_i, x_j)$,就可实现线性不可分的分类问题,其相应的分类函数即为支持向量机^[15]。

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^N a_i y_i K(x_i, x) + b^* \right) \quad (1)$$

本文选用的 LIBSVM 工具箱是台湾大学林智

仁教授开发的 SVM 算法平台, 提供了 S 形、径向基、多项式和线性 4 种核函数, 能够在小样本情况下进行非线性学习, 有效解决多类识别问题。

3.2 基于 LIBSVM 的输电线电流保护自适应策略

3.2.1 应用 LIBSVM 识别 PV 系统等效阻抗的方法

针对 PV 接入可能导致上游保护装置反向误动的问题, 只需在各线路末端加装电流保护装置并匹配方向元件就能解决。但 PV 接入可能导致的上游限时电流速断保护装置拒动和下游电流速断保护误动问题均与 PV 输出功率相关, 单纯通过加装方向元件无法解决。

本文提出一种电流保护整定值自适应新方法: 通过采集保护 PV 侧信息构造状态信息向量, 用 LIBSVM 网络对 PV 不同输出功率运行时的状态信息向量进行非线性学习和训练, 识别出 PV 侧不同运行方式下的等值阻抗, 进而修正整定值。

由于系统侧按无穷大电源考虑, 因此认为系统阻抗恒定, 仅考虑 PV 输出功率、PV 电源电动势、流经保护装置的电流、PV 系统等效阻抗, 构造状态信息向量 $A = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}]$, 其中各元素定义如表 4。

表 4 状态信息向量元素定义

Table 4 Definition of status information vector element

名称	定义
x_{i1}	PV 输出功率
x_{i2}	PV 系统电源电动势
x_{i3}	流经保护装置的电流
x_{i4}	PV 系统等效阻抗

综合 PV 系统不同输出功率下正常运行时的各种状态信息向量, 构造出网络训练样本矩阵。

3.2.2 输电线电流保护自适应判据制定

根据前文仿真结果可知, 故障发生在 PV 系统接入母线与系统电源出口母线之间线路(线路 AB)时, PV 系统导致故障点残压升高, 短路电流减小; 故障发生在其他线路时, PV 系统提供助增电流, 短路电流增大。为了能够充分响应 PV 输出功率及运行方式变化, 本文提出一个时变的输电线电流保护自适应判据为

$$|I_k| > |I_{set}| = \left| K_K \left(\frac{E_S}{Z_S + Z_{\Delta 1}} + (-1)^D \frac{E_{PV}}{Z_{PV} + Z_{\Delta 2}} \right) \right| \quad (2)$$

式中: K_K 为可靠系数; E_S 、 Z_S 分别为系统侧电源电动势和等效阻抗; E_{PV} 、 Z_{PV} 分别为 PV 侧电源电动势和等效阻抗; $Z_{\Delta 1}$ 为系统电源出口母线至保护装置所在线路或下条线路末端阻抗; $Z_{\Delta 2}$ 为 PV 系统出口母线至保护装置所在线路或下条线路末端阻

抗; D 表示保护装置所处位置, 当保护位于 PV 系统接入母线与系统电源出口母线之间时(如图 6 中 QF1), $D=1$; 保护位于其他位置时(如图 6 中 QF2 等), $D=2$ 。

本判据适用于 I 段和 II 段整定值计算。以 QF2 为例, 整定 I 段时, $K_K = 1.2$, $D=2$, $Z_{\Delta 1} = Z_{AB} + Z_{BC}$, $Z_{\Delta 2} = Z_{BC}$; 整定 II 段时, $K_K = 1.2 \times 1.1 = 1.32$, $Z_{\Delta 2} = Z_{BC} + Z_{CD}$, $Z_{\Delta 1} = Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CD}$, $D=2$ 。

保护工作时, 将流经保护装置的电流和 PV 系统输出功率及两侧电源电动势输入 LIBSVM 网络, 识别出当前保护装置 PV 侧等效阻抗 Z_{PV} , 进而通过式(2)计算出当前整定值; 再与流经保护装置的电流进行比较, 判断是否区内故障, 进而发出闭锁或跳闸信号。

3.3 验证

依据图 6 的网架结构和参数, 将不同输出功率下的状态信息输入 Matlab 下的 LIBSVM 工具包, 获得不同运行方式下的等效阻抗, 其结果代入式(2)的自适应保护判据, 与第 2 节各种故障时的短路电流仿真数据对比。鉴于篇幅所限, 本文选取 2.2 节中的两个特例进行分析验证, 自适应整定结果如表 5、表 6 所示。

表 5 f_3 点两相短路故障时自适应判据应用于保护

QF1 限时电流速断保护(II 段)

Table 5 Adaptive protection criterion using on limit current protection of QF1 during two-phase short circuit at f_3

kA			
PV 输出功率/MW	短路电流	无 PV 时整定值	自适应整定值
0	1.823	1.653	1.653
1	1.784	1.653	1.617
3	1.717	1.653	1.586
5	1.649	1.653	1.545

表 6 f_4 点三相短路故障时自适应判据应用于保护 QF2 电流速断保护(I 段)

Table 6 Adaptive protection criterion using on current protection of QF2 during three-phase short circuit at f_4

kA			
PV 输出功率/MW	短路电流	无 PV 时整定值	自适应整定值
0	1.253	1.503	1.503
1	1.316	1.503	1.539
3	1.429	1.503	1.602
5	1.527	1.503	1.684

结果显示, 自适应判据应用于线路 AB 上保护 QF1 保护 II 段时, 随着 PV 输出功率增大, 整定值由 1.653 kA 减小到 1.545 kA, 总小于线路末端发生

两相短路时的故障电流,但灵敏度增大,有效防止了 II 段保护拒动;并且总小于 CD 线路首端 f_4 发生三相短路时的故障电流,说明 II 段整定值没有越线,符合 II 段的保护范围要求。

自适应判据应用于线路 BC 上 QF2 保护 I 段时,随着 PV 输出功率增大,整定值由 1.503 kA 增大到 1.684 kA,并一直大于线路 CD 首端发生三相短路时的故障电流,有效防止了 QF2 保护 I 段误动。

4 结论

(1) PV 系统输出的故障电流总小于 1.2 p.u.且三相对称,短路电流持续时间大于 0.5 s 以上。

(2) 配电网输电线电流保护所受影响与 PV 输出功率相关,输出功率很大时,原有保护装置不再正常工作,整定计算时必须考虑 PV 系统特有的故障特性。

(3) 本文提出的基于 LIBSVM 的输电线电流保护自适应策略能够充分响应 PV 输出功率和运行方式变化,动态调整电流保护整定值,提高保护性能,是一种可以尝试的保护方案。

参考文献

- [1] 张巍, 向铁元, 李安, 等. 基于 MATLAB-PSASP 的光伏并网暂态稳定计算模型[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 80-85.
ZHANG Wei, XIANG Tiejuan, LI An, et al. MATLAB-PSASP based transient stability computation model for grid-connection of PV power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 80-85.
- [2] 刘兴杰, 郭栋, 王凯龙. 基于电气外特性的光伏发电系统模型等效方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 231-238.
LIU Xingjie, GUO Dong, WANG Kailong. Equivalent modeling method for PV system based on its electric external characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 231-238.
- [3] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等效[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [4] 唐彬伟, 袁铁江, 晁勤, 等. 基于 PSCAD 的光伏发电建模与仿真[J]. 低压电器, 2012, 32(21): 31-35.
TANG Binwei, YUAN Tiejian, CHAO Qin, et al. Simulation models for photovoltaic and grid-connected simulation based on PSCAD[J]. Low Voltage Apparatus, 2012, 32(21): 31-35.
- [5] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108-112.
ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 108-112.
- [6] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.
SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.
- [7] 尹靖元, 金新民, 杨捷, 等. 一种可实现两组池板独立 MPPT 控制的新型双逆变器光伏并网变流器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 97-105.
YIN Jingyuan, JIN Xinmin, YANG Jie, et al. A novel PV grid-connected converter with independent MPPT control for two sets of PV cells using dual series inverters topology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 97-105.
- [8] 易桂平. 电网电压不平衡条件下微网恒功率控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 377-387.
YI Guiping. Micro-grid constant power control strategy analysis under grid voltage imbalance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 377-387.
- [9] 郑飞, 张军军, 丁明昌. 基于 RTDS 的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 19-24.
ZHENG Fei, ZHANG Junjun, DING Mingchang. Low voltage ride-through modeling and control strategy for photovoltaic generation system based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 19-24.
- [10] 刘耀远, 曾成碧, 李庭敏, 等. 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 77-82.
LIU Yaoyuan, ZENG Chengbi, LI Tingmin, et al. Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic

- system based on super-capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 77-82.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79.
YANG Guohua, YAO Qi. Simulation study of the influence of photovoltaic power on line protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 75-79.
- [14] 周雪松, 徐晓宁, 马幼捷, 等. 超导故障限流器对继电保护的影响[J]. 中国电力, 2007, 40(3): 36-39.
ZHOU Xuesong, XU Xiaoning, MA Youjie, et al. Research on the influence of super conducting fault current limiter on relay protection[J]. Electric Power, 2007, 40(3): 36-39.
- [15] 吴浩, 李群湛, 刘炜. 基于 PSO-LIBSVM 的广域后备保护新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 49-58.
WU Hao, LI Qunzhan, LIU Wei. A new algorithm of wide-area backup protection based on PSO-LIBSVM[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 49-58.

收稿日期: 2015-12-23; 修回日期: 2016-03-20

作者简介:

孟龙(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源发电并网技术。E-mail: 360819451@qq.com

(编辑 周金梅)