

DOI: 10.7667/PSPC150696

# 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

王秀莲<sup>1</sup>, 胡广<sup>1</sup>, 毕大强<sup>2</sup>

(1. 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110168; 2. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 研究了具备低电压穿越(Low Voltage Ride-Through, LVRT)能力的光伏并网发电系统, 送出线部分发生三相短路故障时, LVRT 控制过程中发出的无功电流对传统比率制动式和新型标积制动式差动保护灵敏度的影响。理论分析表明故障期间无功补偿会导致两种差动保护的灵敏度下降, 并通过 Simulink 搭建光伏并网发电系统仿真模型验证了这一结论。在此基础上, 进一步对比得出发生金属性短路故障时, 标积制动式差动保护的灵敏度受无功补偿影响较小, 作为光伏电站送出线部分的保护效果更佳。最后通过差动特性曲线的整定方式, 对如何提升差动保护灵敏度的问题提出改进建议。

**关键词:** LVRT; 无功补偿; 比率制动; 标积制动; 灵敏度

## Impact analysis of reactive power compensation on sensitivity of differential protection during the low voltage ride-through of photovoltaic systems

WANG Xiulian<sup>1</sup>, HU Guang<sup>1</sup>, BI Daqiang<sup>2</sup>

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The influence of reactive power compensation on sensitivity of differential protection of ratio-restraining characteristic and product-restraining characteristic is studied, when the output line of grid-connected photovoltaic (PV) systems with low voltage ride-through capability occurs three-phase short-circuit failures. It is found that the use of LVRT results in the decline of two kinds of sensitivity of the differential protection. The model of grid-connected photovoltaic (PV) system is set up, and verified by Simulink simulation. And further conclusion shows that the impact of differential protection of product-restraining characteristic on sensitivity is smaller, when the reactive power compensation is injected, and is better for the protection of output lines of photovoltaic power station, when the short-circuit fault occurs. Finally, this paper presents recommendations about how to improve the sensitivity of the differential protection by the tuning mode of differential characteristic curve.

**Key words:** LVRT; reactive power compensation; ratio-restraint; product-restraint; sensitivity

## 0 引言

随着光伏(Photovoltaic, PV)发电系统大规模并入电网, 其对电网的安全稳定运行造成不可忽略的影响<sup>[1-3]</sup>, 因此光伏并网发电系统在自身故障期间的保护措施, 成为电网安全运行的关键因素之一<sup>[4-5]</sup>。PV为逆变器型电源, 短路电流易受温度、光照等影响, 其发出的电功率具有随机波动性和间歇性, 可能导致线路电流纵差保护区内故障时拒动, 区外故

障时误动<sup>[6-9]</sup>。文献[10-12]研究的带有制动量的传统比率式和标积制动式差动保护, 可有效克服外部故障时差动回路的最大不平衡电流、电流互感器饱和的影响, 有效保证了差动保护工作的可靠性。

同时, 为保证电网的安全稳定运行, 世界各国对光伏并网发电的要求越来越严格, 要求 PV 电站须具备 LVRT 能力: 即当电网故障或并网点电压波动时, 光伏电站在其可承受范围内能够不间断并网运行, 同时为支撑电网电压恢复, 逆变器须发出一

定量无功电流注入电网。文献[13]指出低电压穿越控制策略可能改变故障电流的大小以及电流、电压间的相位关系,这对依靠电流大小门槛值来识别故障的保护以及依靠检测电压、电流之间相位来判别故障位置的方向元件,均会产生一定的影响。无功量的注入必将导致电网潮流的变化,对继电保护装置产生不可避免的影响。

本文主要研究了光伏并网发电系统低电压穿越期间,逆变器无功补偿对比率制动特性和标积制动特性差动保护灵敏度的影响。通过理论推导分析得出 LVRT 控制中发出的无功会导致两种差动保护的灵敏度下降,采用 Simulink 仿真分析验证了这一结论。并且进一步研究得出发生金属性短路故障时,标积制动特性差动保护灵敏度受无功补偿影响较小,用于光伏电站送出线保护效果更佳。

## 1 比率制动与标积制动特性

### 1.1 传统比率制动式差动保护

比率制动特性是利用故障电流来产生制动作用,故障电流越大时制动作用就越大,反之则越小,与此同时继电器的动作电流也随之增大或减小。可以有效防止外部短路引起的误动。

取继电器差动电流  $I_d$  为

$$I_d = |I_1 - I_2| \quad (1)$$

制动电流  $I_z$  为

$$I_z = |I_1 + I_2| / 2 \quad (2)$$

式中:  $I_d$  为差动电流;  $I_z$  为制动电流;  $I_1$ 、 $I_2$  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)。

比率制动式差动保护判据为

$$\begin{cases} I_d > I_s & (I_z \leq I_{z,0}) \\ I_d > I_s + K_1(I_z - I_{z,0}) & (I_z > I_{z,0}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $I_s$  为启动电流;  $I_{z,0}$  为拐点电流;  $K_1$  为比率制动特性的斜率。

根据文献[14]中的计算导则对参数进行整定,  $I_s$  取为  $0.2I_N$ ,  $I_{z,0}$  取为  $0.8I_N$ ,  $K_1$  取为 0.5。图 1 所示为纵差保护的比率制动特性。

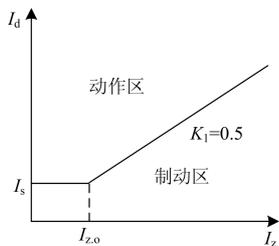


图 1 比率制动特性曲线

Fig. 1 Curve of ratio restraint characteristic

### 1.2 标积制动式差动保护

实际上,标积制动式差动保护仅仅是比率制动式差动保护的另一种表达方式<sup>[15]</sup>,根据比率制动式差动保护表达式:

$$|I_1 - I_2| > K_1 |I_1 + I_2| \quad (K_1 < 0.5) \quad (4)$$

展开得

$$I_1^2(1 - K_1^2) + I_2^2(1 - K_1^2) - 2I_1I_2(1 + K_1^2)\cos\theta > 0 \quad (5)$$

$$|I_1 - I_2|^2 > \frac{4K_1^2}{1 - K_1^2} I_1I_2 \cos\theta \quad (6)$$

式中,  $\theta$  为  $I_1$  与  $I_2$  的相角差。

令  $K = \frac{4K_1^2}{1 - K_1^2}$  带入上式可得标积制动表达式:

$$|I_1 - I_2|^2 \geq K |I_1| |I_2| \cos\theta \quad (7)$$

设  $I_{db} = |I_1 - I_2|$ ,  $I_{zb} = \sqrt{K |I_1| |I_2| \cos\theta}$  为标积制动原理的动作量和制动量。

区内故障时,有  $90^\circ < \theta < 270^\circ$ ,  $\cos\theta < 0$ , 令  $I_{zb} = 0$ , 无制动作用; 区外故障时,有  $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ,  $\cos\theta \geq 0$ ,  $I_{zb} \neq 0$ , 有制动作用。

## 2 系统建模与分析

### 2.1 光伏低电压穿越无功补偿标准

国家电网公司 2011 年颁布的《光伏发电站接入电力系统技术规定》对光伏发电站的动态无功支撑能力提出了确切的要求<sup>[16]</sup>。

(1) 自电网电压跌落的时刻起,动态无功电流的相应时间不大于 30 ms。

(2) 自动态无功电流响应起一直到电压恢复至 0.9PU 期间,光伏发电站注入电力系统的动态无功电流  $I_T$  应实时跟踪并网点电压变化,并应满足:

$$\begin{cases} I_T \geq 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N & (0.2 \leq U_T \leq 0.9) \\ I_T \geq 1.05 \times I_N & (U_T \leq 0.2) \\ I_T = 0 & (U_T > 0.9) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U_T$  为光伏发电并网点电压标幺值;  $I_N$  为光伏电站额定电流。

根据新的国家标准,在检测到并网点电压跌落时,要求光伏发电系统在 0.625 s 之内不脱网。并且根据电压跌落的深度,持续向电网注入相应等级的无功电流支撑电网电压恢复。实际上,导致并网点电压跌落的故障因素有很多,本文研究的仅是三相电压短路接地情况。按差动保护的保护范围故障类型又分为两类:光伏发电系统送出线部分的区内故障和送出线以外部分的区外故障。

### 2.2 光伏发电系统建模

光伏并网发电系统主要由光伏阵列、三相逆变

器、稳压电容、滤波电感、公共电网等部分组成。对于逆变器的控制,采用基于电网电压定向的矢量双闭环控制策略。具体的光伏并网系统结构如图 2 所示。

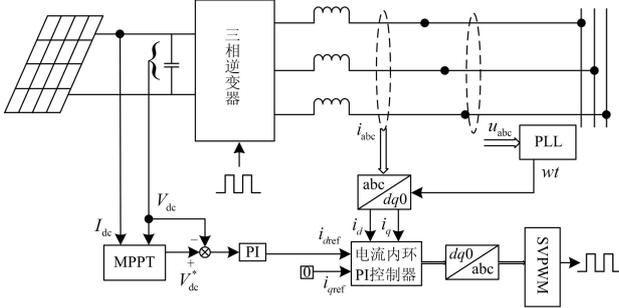


图 2 光伏并网发电系统结构

Fig. 2 Construction of grid-connected photovoltaic (PV) system

### 2.3 故障线路分析

由《光伏电站接入电力系统技术规定》可知,当电网发生区外故障(AB 段以外线路)电压低于 0.9PU 差动保护不应立即动作,需要有一定的延迟用以电网输电线路的主保护动作切除故障<sup>[17]</sup>。然而发生如图 3 所示的 AB 段发生故障(区内故障)时,差动保护应立即动作,切除保护区域内的故障。故此,在确保差动保护装置不误动的同时,应尽量保证其灵敏度在较高水平。

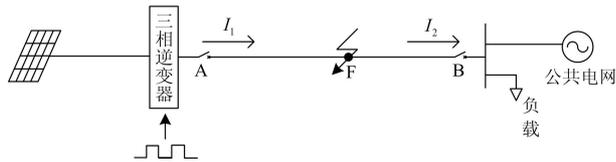


图 3 短路故障示意图

Fig. 3 Schematic diagram of short-circuited fault

根据差动保护的灵敏系数定义有:

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

式中,  $I_{\text{op}}$  为差动保护的動作电流值。

#### 2.3.1 无无功补偿的系统区内故障

在理想情况下,当光伏并网发电系统发生区内短路故障且不进行无功补偿时,故障点 F 两侧电流的相位正好相反,可以假定两侧的短路电流标量分别为  $1.2I_N$  与  $nI_N$ 。此时,比率制动特性差动保护的動作电流与制动电流由式(1)、式(2)可知:

$$I_d = |I_1 - I_2| = (n+1.2)I_N \quad (10)$$

$$I_z = |I_1 + I_2|/2 = \left(\frac{n-1.2}{2}\right)I_N \quad (11)$$

根据式(11)当  $I_z \leq 0.8I_N$  即  $nI_N \leq 2.8I_N$  时,比率

特性的制动电流为  $I_z < I_{z0}$ , 此时的動作电流为  $I_{\text{op}} = I_s = 0.2I_N$ , 式(9)所示的灵敏度系数为  $K_{\text{sen}} = 16$ ; 当  $I_z > 0.8I_N$  即  $nI_N > 2.8I_N$  时,比率特性的制动电流为  $I_z > I_{z0}$ , 動作电流为

$$I_{\text{op}} = 0.2 + (n-0.8)/2 \quad (12)$$

标积制动特性差动保护的動作电流与制动电流分别为

$$I_{\text{db}} = |I_1 - I_2| = (n+1.2)I_N \quad (13)$$

$$I_{\text{zb}} = \sqrt{K} |I_1| |I_2| \cos \theta = 0 \quad (14)$$

根据式(14)以及在发生区内短路故障时,有  $90^\circ < \theta < 270^\circ$ ,  $\cos \theta < 0$ ,  $I_{\text{zb}} = 0$ , 无制动作用,标积制动特性制动电流为  $I_{\text{zb}} < I_{z0}$ ; 動作电流为  $I_{\text{op}} = 0.2I_N$ 。式(9)所示的灵敏度系数为  $K'_{\text{sen}} = 16$ 。由此分析得到,在没有无功补偿情况下,发生区内故障且网侧故障电流  $I_2$  小于  $2.8I_N$  时,比率制动特性差动保护与标积制动特性差动保护的灵敏度相等。

但是,在实际的线路短路故障中,网侧电流  $I_2$  大小取决于线路阻抗及电网容量的配置,远大于  $2.8I_N$ 。由式(12)比率制动特性下動作电流  $I_{\text{op}} = 0.2 + (n-0.8)/2 > 0.2I_N$  即  $K'_{\text{sen}} > K_{\text{sen}}$ 。可知,在实际工况下被保护线路发生短路故障,标积制动式差动保护的灵敏度高于比率制动式差动保护的灵敏度。

#### 2.3.2 有无功补偿系统的内部故障

光伏并网发电系统发生区内短路故障进行无功补偿时,补偿量的大小随着电压跌落的深度变化而变化,无功电流的注入必将导致系统功率因数的改变。根据国标对无功补偿的要求可知,注入系统的无功电流应为容性,用以支撑电网电压恢复。

正如图 3 所示,故障期间故障点 F 左侧电流的相位在无功补偿期间超前于电压相位,从而故障点两侧电流的相位差小于  $180^\circ$ 。有无功补偿时,故障点两侧电流的矢量差( $I_1 - I_2$ )和矢量和( $I_1 + I_2$ )如图 4 所示。

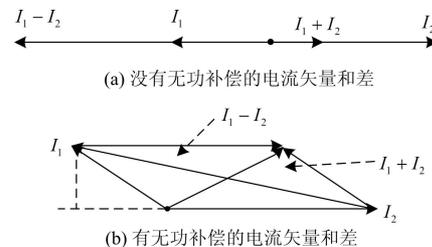


图 4 电流矢量合成

Fig. 4 Current vector synthesis

对于比率制动特性差动保护,无功电流注入光伏发电系统使得差动电流  $I_d$  (矢量差)减小而制动电

流  $I_z$  (矢量和) 增大, 导致灵敏度会有下降; 对于标积制动特性差动保护, 虽然相位差  $\theta$  取值范围在  $90^\circ \sim 180^\circ$ , 制动电流  $I_{zb}=0$ , 但是差动电流  $I_{db}$  减小, 其灵敏度也会下降。

### 3 仿真分析

#### 3.1 系统仿真

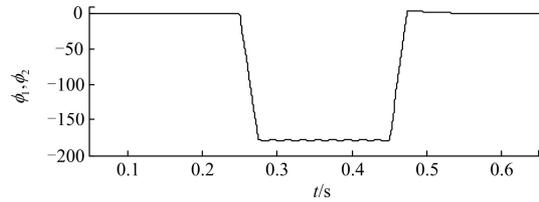
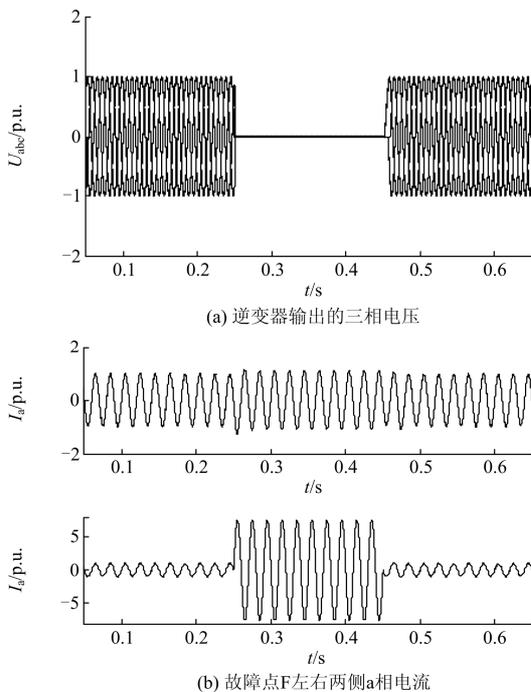
本文采用 Matlab 软件作为仿真工具, 搭建额定功率为 250 kW 光伏并网发电系统, 对前面分析的可行性和正确性进行仿真验证。光伏发电系统的具体参数如表 1 所示。

光伏发电系统在 0.2 s 时发生三相短路故障(区内故障) 电网电压跌落。本文仿真的电压跌落深度依次为 30%、50%、70%及 100%。电压跌落 100% 期间未采取 LVRT 控制时逆变输出的三相电压及故障点 F 两侧 A 相电流、电流相位、电流相位差的波形如图 5 所示。采取 LVRT 控制后的波形如图 6 所示。

表 1 系统参数设置

Table 1 Design of system parameters

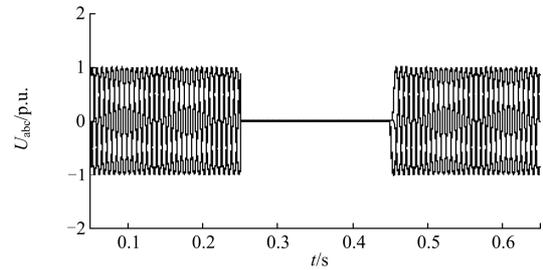
参数	取值
交流电网电压有效值	380 V
交流电网频率	50 Hz
直流侧给定电压	650 V
直流侧滤波电容	4 200 $\mu$ F
逆变侧滤波电感	0.3 mH
电压跌落方式	三相对称跌落
跌落持续时间	0.2 s



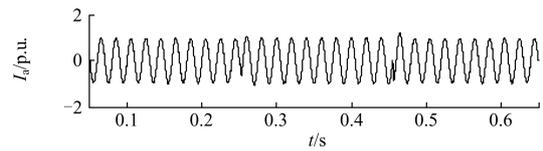
(c) 故障点F两侧电流的相位差

图 5 未采取 LVRT 控制的仿真波形

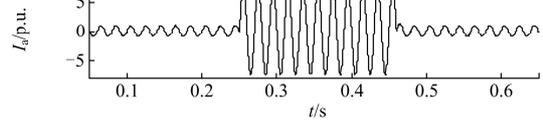
Fig. 5 Simulation waveform without LVRT control



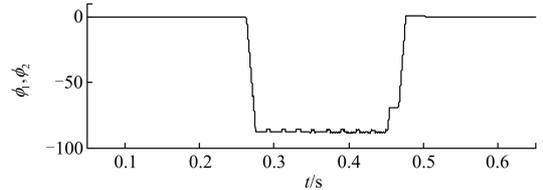
(a) 逆变器输出的三相电压



(b) 故障点F左右两侧a相电流



(c) 故障点F左右两侧a相电流



(c) 故障点两侧电流的相位差

图 6 采取 LVRT 控制的仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms with LVRT control

由图 6 可以看出, 无 LVRT 控制策略时, 逆变器输出故障电流通过限制电流内环给定值  $I_{dref}$ , 使其输出的故障电流均不超过额定电流的 1.2 倍。未采取 LVRT 控制时, 逆变器输出的故障电流相位没有发生改变而电网侧故障电流的相位与故障前相反, 导致故障点 F 两侧的电流有  $180^\circ$  相位差; 采取 LVRT 控制后, 逆变器在短路故障发生时发出一定量的无功电流使得输出电流相位发生改变, 导致故障点两侧相位差接近  $90^\circ$ 。

#### 3.2 故障期间不采取无功补偿时比率制动和标积制动的灵敏分析

光伏并网发电系统发生内部短路故障, 电压跌

落深度的变化导致比率制动特性的灵敏度  $K_{sen}$  和标积制动特性的灵敏度  $K'_{sen}$  的变化如表 2 所示。随着电压跌落深度的增大,比率制动特性灵敏度呈下降趋势而标积制动特性差动保护的灵敏度有相应程度的增大。同时,验证了在理想情况下未采取无功补偿措施且制动电流小于  $I_{z,0}$  时,比率制动特性和标积制动特性差动保护的灵敏度相等,但在实际线路故障中比率制动特性的灵敏度低于标积制动特性的灵敏度这一分析结论。

表 2 电压跌落深度与各参数对应关系  
Table 2 Relationship between the depth of voltage sag and parameters

$\Delta/\%$	$\theta/(^\circ)$	$I_d/\text{p.u.}$	$I_z/\text{p.u.}$	$K_{sen}$	$I_{db}/\text{p.u.}$	$I_{zb}/\text{p.u.}$	$K'_{sen}$
30	-180	3.72	0.65	18.60	3.72	0	18.60
50	-180	5.04	1.32	10.95	5.04	0	25.2
70	-180	6.42	2.00	8.03	6.42	0	32.1
100	-180	8.78	3.20	6.27	8.78	0	43.90

### 3.3 故障期间采取无功补偿时比率制动和标积制动的灵敏度分析

由图 6 的仿真波形分析得到,差动保护的保护区内发生短路故障时,光伏逆变器侧电流幅值限制到  $1.05I_N$ ,而电网侧电流幅值没有限制明显增大、故障点 F 两侧的相位差为  $-90^\circ$ ,因此故障期间采用 LVRT 控制对系统有着不可忽略的影响。根据表 2 与表 3 所示的电压跌落深度与各参数的对应关系,电压跌落深度相同时,采用 LVRT 控制的差动电流  $I_d$  较未采用 LVRT 时小,即采用 LVRT 控制时的灵敏度低于未采用 LVRT 控制时的灵敏度。特别是在发生金属性短路故障电压跌落 100% 情况下,无功补偿对比率制动特性差动保护影响更大,标积制动特性受到的影响相对较小。因此,标积制动更适用于具有低电压穿越技术的光伏电站输出线路差动保护。

表 3 电压跌落深度与各参数对应关系  
Table 3 Relationship between the depth of voltage sag and parameters

$\Delta/\%$	$\theta/(^\circ)$	$I_d/\text{p.u.}$	$I_z/\text{p.u.}$	$K_{sen}$	$I_{db}/\text{p.u.}$	$I_{zb}/\text{p.u.}$	$K'_{sen}$
30	-160	3.68	0.75	18.40	3.68	0	18.40
50	-145	4.60	1.36	9.58	4.60	0	23.00
70	-125	6.08	2.40	6.08	6.08	0	30.04
100	-90	7.58	3.79	4.46	7.58	0	37.90

由于比率制动式差动保护的灵敏度与动作特性曲线密切相关,制动曲线上启动电流、拐点电流及斜率等因素直接影响着保护装置的灵敏度,但是不能仅改变其中任一个因素用以提升保护的灵敏度。在保证最大制动电流对应的动作电流相等的前提

下,可以适当降低启动电流整定值的同时提高拐点电流整定值,此时斜率已然确定。而标积制动式差动保护在送出线路发生区内故障时  $\cos\theta < 0$ ,制动量为 0。因此标积制动原理反应内部故障灵敏度仅与启动电流整定有关,在确保可靠性的前提下适当降低启动值可以起到提升保护灵敏度的作用。

## 4 结语

本文采用理论推导和仿真验证相结合的方法,分析了光伏并网发电系统低电压穿越过程中比率制动特性和标积制动特性差动保护灵敏度受到的影响情况,得出结论如下:

(1) 经过理论推导表明低电压穿越控制过程中,逆变器发出的无功电流导致两种差动保护的灵敏度下降;

(2) 通过仿真对理论推导所得结论加以验证,并且对比分析了标积制动式和比率制动式差动保护的灵敏度,进一步得出前者受到的影响更小,更适合用于光伏电站送出线路的保护。

最后通过差动特性曲线的整定方式,对如何提升差动保护灵敏度的问题提出改进建议,下一步将重点研究光伏并网发电系统低电压穿越过程中差动保护灵敏度的提升方法。

## 参考文献

- [1] 李题印,韩永强,胡晓琴,等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13.
- LI Tiying, HAN Yongqiang, HU Xiaoqin, et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.
- [2] 黄冬冬,吴在军,窦晓波,等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 107-112.
- HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality composite control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 107-112.
- [3] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
- WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [4] SO C W, LI K K. Protection relay coordination on

- ring-fed distribution network with distributed generations[C] // Proceedings of 2002 IEEE region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering. Beijing, China: IEEE, 2002: 1885-1888.
- [5] WAN Hui. Protection coordination in power system with distributed generation[D]. Hong Kong, China: Hong Kong Polytechnic University, 2006.
- [6] 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.
- [7] 吴通华, 郑玉平, 朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 61-67.  
WU Tonghua, ZHENG Yuping, ZHU Xiaotong. Current differential protection based on transient capacitance current compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 61-67.
- [8] 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.
- [9] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5.  
ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5.
- [10] 陆于平, 李玉海, 李鹏 等. 差动保护灵敏度与启动电流、制动系数和原理之间的关系[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 51-55.  
LU Yuping, LI Yuhai, LI Peng, et al. Discussion on relationship of pick-up current, restrained factor and principles to the differential protection sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 51-55.
- [11] 尹项根, 邵能灵, 杨书富. 标积制动量的应用与分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 86-89.  
YIN Xianggen, TAI Nengling, YANG Shufu. The application and analysis of the differential protection with the product-restraint quantity[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 86-89.
- [12] 丛伟, 张琳琳, 程学启, 等. 基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 26-30, 36.  
CONG Wei, ZHANG Linlin, CHENG Xueqi, et al. Criterion of current differential protection based on amplitude and phase difference of fault current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 26-30, 36.
- [13] 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. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.
- [14] 国家电网公司. 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [15] 桂林, 王祥珩, 王维俭. 新型标积制动式差动保护的 分析研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 15-21.  
GUI Lin, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Research on new scalar product restraint differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 15-21.
- [16] 国家电网公司. Q/GDW 617—2011 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- [17] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1-6.  
ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-through capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 1-6.

收稿日期: 2015-04-24; 修回日期: 2015-07-01

作者简介:

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

胡广(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网发电技术; E-mail: 15910364042@163.com

毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。

(编辑 姜新丽)