# 基于油田背景下光伏并网对配电网继电保护的影响

郭冰聪，康忠健

（中国石油大学（华东）电气工程系, 山东 青岛 266580）

**摘要：随着新能源技术的发展，光伏发电成为当今世界研究热点之一，光伏电源的接入使配电网变为双电源或多电源供电系统，给配电网传统的继电保护配置方案带来了全新的挑战。基于油田电网的研究背景，应用 DIgSILENT 仿真平台搭建了光伏并网发电系统的工程模型，分析介绍了该软件进行继电保护的仿真建模原理，在此基础上定量分析了在光伏系统接入的情况下对配电网的短路电流和线路保护所产生的影响，并对此提出了解决建议和策略。**

**关键词：DIgSILENT；配电网；继电保护；油田**

## The effects of grid-connected photovoltaic system on distribution network protection under the background of oil field

GUO Bingcong, KANG Zhongjian

(Department of Electrical Engineering, China University of Petroleum(East China) , Qingdao 266580, China)

**Abstract:** With the progress of new energy technology, photovoltaic has become one of the hot spots of research in today's world, the access of photovoltaic power sources has turned the distribution network into a dual-supply or multi-supply power supply system, which brings new challenges to the relay protection configuration scheme of the distribution system. Based on the oil field electrical network as the research background, use the engineering model of photovoltaic grid-connected power generation system is built by DIgSILENT simulation platform. The modeling principle is introduced, and the effects of system access on the short-circuit current and line protection of the distribution network are analysed quantitatively in the case of PV system access, and different solutions and strategies are proposed.

**Key words:** DIgSILENT; distribution network; relay protection; oil field

## 0 引言

在能源资源减少和严峻的环境形势的大背景下，石油作为传统能源的代表，对环境的影响尤为明显，开发利用新能源是目前十分重要的目标方向。新能源技术不断发展，分布式发电技术兴起。

分布式光伏发电技术是利用半导体材料的光生伏特效应将光能转变为电能的一种技术，光伏发电的使用使太阳能资源的利用率大大提高。光伏发电并网后，传统单电源辐射型网络将变成双端甚至多端网络，系统的潮流及短路电流分布也将发生变化。电力系统越来越复杂

中国石化科技计划项目(315120)

化的运行方式，使继电保护的运行分析面临巨大的困难，也给继电保护带来了新的挑战。文献[1-2]探讨了大量光伏的接入对保护装置协调的影响，并针对发现的问题提出了自适应保护方案。文献[3-4]分析推导了不同光伏容量、并网点对故障电流的影响。文献[5]分析了不同光伏并网点对距离保护的影响。文献[6]对低电压穿越运行过程中的IIDG的故障电流特性进行研究，进而分析含IIDG的电网故障特征。文献[7]根据结构和位置关系，通过详细的理论分析说明了分布式电源接入后对继电保护拒动作、误动作、保护整定以及重合闸的影响。文献[8]提出将配电网分区保护，依据故障定位判据对故障区域定位，并利用智能装置发出相关命令使断路器断开。文献[9]应用Matlab进行过电流数字继电器的仿真分析，在正常条件、电动机起动和故障条件三种情况下对继电器的性能进行研究。继电器能够区分故障电流和电动机的起动电流，并且只在故障状态下工作。

DIgSILENT软件是进行电力系统分析与控制的专业仿真软件。本文对油田电网在光伏并网前后对继电保护的影响进行研究，利用DIgSILENT软件搭建油田配电网模型，设置故障事件并进行电磁暂态仿真验证，分析了光伏并网前后对配电网保护的影响，并对光伏并网后的保护配置给出了建议。

## 1 油田光伏并网概述

胜利油田地区太阳能资源丰富，开发利用前景广阔，价值巨大。在太阳能利用方面，胜利油田处于太阳能地区三类地区，接近二类地区（东营地区年总光照辐射5 199 MJ/m）。其中油田地区是利用太阳能最好的。油田闲置土地、井场和厂矿房顶面积约130 $km^2$。文献[10]提到进行太阳能利用具有优越条件，总资源相当于230亿t标准煤。

油田对电能的需求，使得油田在作为一个产能大户的同时又是一个耗能大户，常规能源的高污染和不可再生的性质同需求产生了矛盾，同时太阳能作为一种清洁、可再生的新能源，光伏发电应运而生，是传统发电的补充。国家发布的分布式光伏电站每发一度电，国家补贴0.42元（补贴20年），大型光伏电站实行国家上网标杆电价等政策，使得利用太阳能进行光伏发电成为电力系统发展的重要方向之一。

### 1.1 光伏并网系统

光伏发电系统是指把太阳能转化为电能，通过并网逆变器和变压器将电能送上电网的系统。光伏发电主要依靠光伏传感器将太阳能转换成电能供电，然后将电输送入配电网进行并网发电。光伏发电系统一般由光伏板、逆变器等设备组成。光伏系统的基本元件是光伏电池，将电池分组形成模块，这些模块组成光伏阵列，如图 1 所示。

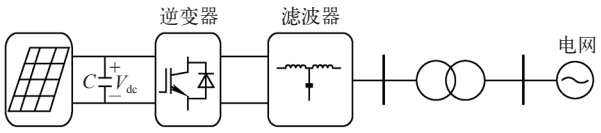


图1 并网光伏发电系统

Fig. 1 Single-stage isolated grid-connected PV system

### 1.2 光伏并网对继电保护的影响

配电网络起到连接主网与负荷和分配电能的作用。传统的配电网多是被动配电网，分布式电源接入配电网后势必会改变配电网潮流的分布，并带来诸多影响。如当系统发生短路故障时，会影响短路电流和线路保护、故障清除过程以及影响特殊情况下的孤岛运行等。光伏发电的并网运行必将给配电网的继电保护装置的可靠动作带来诸多不利影响。随着近年来光伏接入量的不断增加，使人们开始重视光伏并网对继电保护的影响。

## 2 DIgSILENT 继电保护仿真建模

继电保护能反映电气元件的不正常工作状态并发出信号；当系统出现故障时，能自动、有选择性及快速地将故障元件从系统切除，无故障部分继续运行，使系统受影响最小。

继电器是进行继电保护的电气元件，当电压、电流和温度等输入量达到规定值时，被控制的输出电路将导通或断开。

继电保护进行仿真首先需要进行图形化建模，为各个元件设置参数、选择线路型号等。利用该软件的潮流分析和短路计算功能进行初始化运算，并对选择的继电器模型进行整定，最后通过设置短路事件进行仿真验证。保护仿真流程如图2所示。

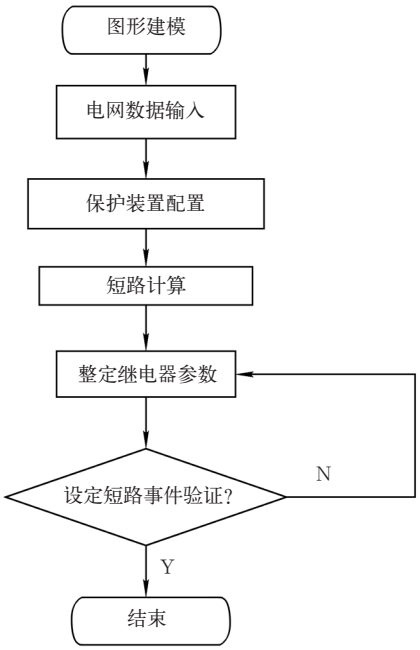


**图2　保护仿真流程图**

**Fig. 2 Flow chart of protection simulation**

继电器架构用图形规定通用的继电器功能，与具体保护架构相关的继电器类型通过对每个槽选择功能块来定义，保护设备建模的每个层次都发挥不同作用，保护设备的建模仿真架构如图3所示。

## 3　光伏接入对配电网继电保护的影响

当前传统的配电网网架结构是单电源辐射电网，通常继电保护装置所配置的保护主要采用速断和过电流两种保护方式。光伏电源的接入将会影响故障电流的大小甚至改变故障电流的方向，从而给保护的范围、灵敏度、选择性以及相邻线路之间保护装置的相互配合带来影响。严重时还可能会导致配电网既有的保护误动作或拒动作，因此传统的继电保护将不再适用，需要进一步对含光伏系统的配电网进行继电保护的研究。

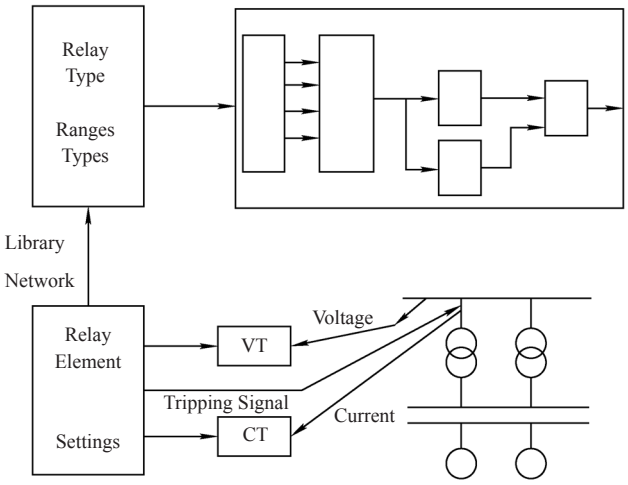


**图3　保护设备的建模仿真架构**

**Fig. 3 Modelling simulation structure for protection devices**

图4为光伏并网部分的网架结构。图中1~4为线路保护的安装位置；$K_1$～$K_4$为故障点的设置位置。下面讨论发生故障时对电流和距离保护的影响。

### 3.1　对电流保护的影响

光伏系统接入后，光伏电源和系统电源同时向故障点注入短路电流，从而使故障点的故障电流比没有接入光伏的配电网要大。光伏并网点位于保护1的下游和保护2的上游。

1）当保护1所在线路末端$K_1$发生故障时，故障点位于光伏电源的上游，此时通过保护1的电流未受到影响，应基本与未接入光伏时一致，且通过保护2和3的电流为零，因此光伏接入对保护1的保护范围不会产生影响，且保护2和3也不会误动作。

2）保护2所在线路末端$K_2$发生故障（或发生$K_4$故障）时，此时发生故障在分布式电源下游。

保护1由于光伏的接入对并网点处的母线电压起到支撑作用，从而抑制了电流，同时对保护1的短路电流起到抑制作用，使流过保护1的

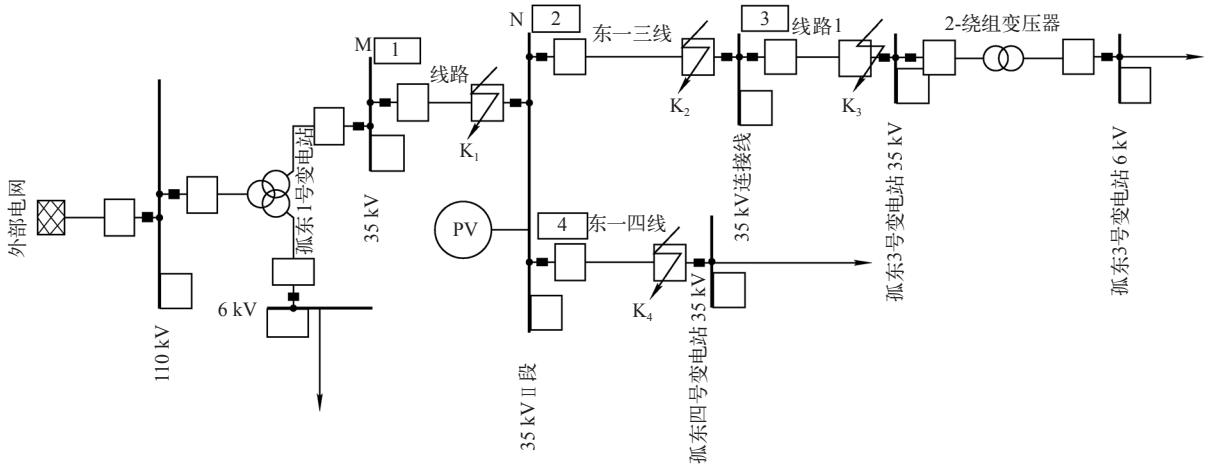


图4　配电网仿真图

Fig. 4 Distribution network simulation diagram

故障电流减小。由于故障，保护1的灵敏度降低。正常情况下保护1不动作，但是在保护2拒动作或断路器故障时，保护1会因故障电流的减小而影响作为后备保护的性能。

保护2的短路电流由于光伏系统的助增作用有所增加，使得保护装置2的保护范围扩大，甚至可能延伸至下一级线路，导致误动作，但提高了保护2的灵敏度，保证保护2可靠跳开，其他的保护不受影响。

### 3.2　对距离保护的影响

（1）故障发生在光伏电源上游 $K_1$时

光伏未接入时，保护1的测量阻抗表达式为

$$Z_{\text{jm}}=\frac{\boldsymbol{U}_{\text{m}}}{\boldsymbol{I}_{\text{m}}}=\frac{Z_{\text{Mf}}\boldsymbol{I}_{\text{m}}}{\boldsymbol{I}_{\text{m}}}=Z_{\text{Mf}} \tag{1}$$

光伏接入时，保护1的测量阻抗表达式为

$$Z'_{\text{jm}}=\frac{\boldsymbol{U}_{\text{m}}}{\boldsymbol{I}_{\text{m}}}=\frac{Z_{\text{Mf}}\boldsymbol{I}_{\text{m}}}{\boldsymbol{I}_{\text{m}}}=Z_{\text{Mf}} \tag{2}$$

式中，$Z_{\text{jm}}$、$Z'_{\text{jm}}$为保护1光伏接入前后的测量阻抗；$U_{\text{m}}$为母线M的电压；$I_{\text{m}}$为故障后流过保护1的电流；$Z_{\text{Mf}}$为母线M与故障点f间线路的阻抗。

即当光伏电源接入且在母线上游发生故障时，$Z_{\text{jm}}=Z'_{\text{jm}}$，保护1的测量阻抗不变，因此上游故障时，故障线路的距离保护Ⅰ、Ⅱ段在光伏电源接入时没有影响。

（2）故障发生在光伏电源下游$f_2$时

光伏未接入时，保护1和保护2的测量阻抗表达式分别为

$$Z_{\text{jm}}=\frac{\boldsymbol{U}_{\text{m}}}{\boldsymbol{I}_{\text{m}}}=Z_{\text{MN}}+Z_{\text{Nf}} \tag{3}$$

$$Z_{\text{jn}}=\frac{\boldsymbol{U}_{\text{n}}}{\boldsymbol{I}_{\text{n}}}=\frac{Z_{\text{Nf}}\boldsymbol{I}_{\text{n}}}{\boldsymbol{I}_{\text{n}}}=Z_{\text{Nf}} \tag{4}$$

光伏接入35 kV Ⅱ段母线时，保护1和保护2的测量阻抗表达式分别为

$$Z'_{\text{jm}}=\frac{\boldsymbol{U}_{\text{m}}}{\boldsymbol{I}_{\text{m}}}=\frac{Z_{\text{MN}}\boldsymbol{I}_{\text{m}}+Z_{\text{Nf}}(\boldsymbol{I}_{\text{m}}+\boldsymbol{I}_{\text{l}})}{\boldsymbol{I}_{\text{m}}}=Z_{\text{MN}}+kZ_{\text{Nf}} \tag{5}$$

其中

$$k=\frac{\boldsymbol{I}_{\text{l}}+\boldsymbol{I}_{\text{m}}}{\boldsymbol{I}_{\text{m}}} \tag{6}$$

$$Z'_{\text{jn}}=\frac{\boldsymbol{U}_{\text{n}}}{\boldsymbol{I}_{\text{n}}}=\frac{\boldsymbol{Z}_{\text{Nf}}\boldsymbol{I}_{\text{n}}}{\boldsymbol{I}_{\text{n}}}=Z_{\text{Nf}} \tag{7}$$

式中，$Z_{\text{jn}}$、$Z'_{\text{jn}}$为保护2光伏接入前后的测量阻抗；$U_{\text{n}}$为母线N的电压；$I_{\text{n}}$为故障后流过保护2的电流；$Z_{\text{Nf}}$为母线N与故障点f间线路的阻抗；$Z_{\text{MN}}$为母线M和母线N之间线路的阻抗；$Z_{\text{Nf}}$为母线N与故障点f间线路的阻抗；$I_{\text{l}}$为光伏出口的电流。

当光伏电源接入35 kV Ⅱ段母线，故障发生在母线下游且在上游距离保护Ⅱ段范围内时，$Z_{\text{jn}}=Z'_{\text{jn}}$，说明光伏电源接入前后，下游故障线

路保护2的测量阻抗不变。这是由于距离保护同时反映于电压和电流量，当有光伏电源提供助增电流时，下游保护安装处测量电流增大，相应的测量电压也增大，因此光伏电源接入对于下游故障线路的距离保护Ⅰ、Ⅱ段没有影响；而由于$k$值恒大于1，$Z_{jn}<Z'_{jn}$，说明光伏电源接入35 kVⅡ段母线后，由于助增电流的影响，存在分支系数$k$，使上游保护1的测量阻抗增大，因此光伏电源接入使上游的距离保护Ⅱ段范围缩小，灵敏度下降。

## 4 仿真分析

下面将通过一个配电网的DIgSILENT模型算例对光伏接入电网时电网短路电流及测量阻抗的影响进行分析。油田新孤变电站电网的简化结构如图5所示。

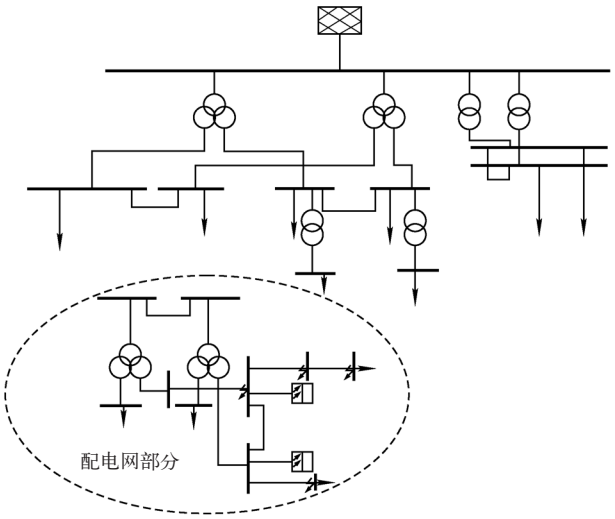


图5 新孤变电站电网简化结构

Fig. 5 Simplified structure of Xingu substation network

线路参数$r$=1.457 Ω/km，$x$=2.253 Ω/km，线路和线路1为2 km，东一三线和东一四线为5.55 km。光伏电源从35 kVⅡ段母线接入，故障$K_1$发生在线路末端，故障$K_2$发生在东一三线末端，故障$K_3$发生在线路1末端，故障$K_4$发生在东一四线末端。

### 4.1 短路电流仿真

下面分析光伏并网前后在不同的故障位置时，各线路流经的故障电流情况。本文设定的光伏接入位置在母线孤东一号变电站35 kVⅡ段处。

光伏系统接入后光伏电源和系统电源同时向故障点注入短路电流，从而使故障点的故障电流比没有接入光伏的配电网要大。短路点电流如图6、图7所示。

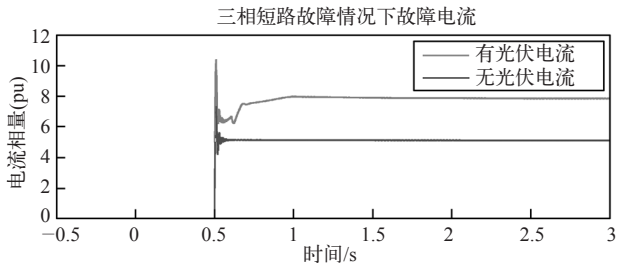


图6 三相短路故障电流

Fig. 6 The current of three-phase short circuit fault

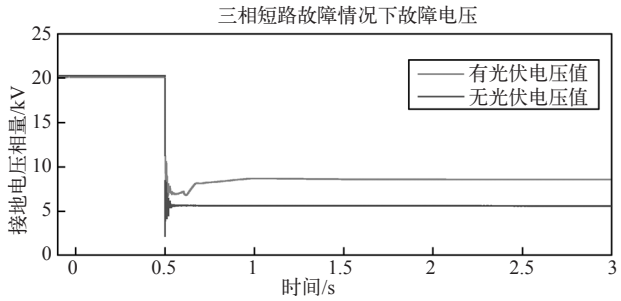


图7 三相短路故障电压

Fig. 7 The voltage of three-phase short circuit fault

光伏并网前后短路电流如表1、表2所示。

表1 光伏并网前短路电流

Tab. 1 Short circuit current before grid-connected

| 短路点 | 流过短路点电流 | 流过保护装置的电流 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $K_1$ | 2.806 | 2.808 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| $K_2$ | 2.067 | 2.109 | 2.068 | 0.001 | 0.024 |
| $K_3$ | 1.869 | 1.922 | 1.870 | 1.870 | 0.030 |
| $K_4$ | 2.065 | 2.109 | 0.024 | 0.024 | 2.066 |

由表1和表2测得的数据对比可知，光伏并网前后流过短路点的电流明显增大，$K_1$发生短路故障保护变化不大，$K_2$、$K_3$和$K_4$发生短路故障时使流过保护1的故障电流减小，保护1的灵敏度降低，保护1的保护范围相对缩短，同前文

表2 光伏并网后短路电流

Tab. 2 Short circuit current after grid-connected

| 短路点 | 流过短路点电流 | 流过保护装置的电流 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $K_1$ | 4.195 | 2.808 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| $K_2$ | 3.175 | 2.049 | 3.176 | 0.001 | 0.038 |
| $K_3$ | 2.824 | 1.702 | 2.825 | 2.825 | 0.047 |
| $K_4$ | 3.173 | 2.044 | 0.037 | 0.037 | 3.175 |

理论分析结果一致。

### 4.2 光伏接入对配电网距离保护的影响

故障$F_1$发生在线路的中性点，故障$F_2$发生在东一三线中性点，仿真结果如表3所示，$F_1$故障时保护1的测量阻抗值无变化，$F_2$故障时保护1的测量阻抗值增大，保护2的测量阻抗值几乎无变化。

表3 光伏并网前后的保护测量值

Tab. 3 Measured value of the protective device

| 故障点 | 参数 | 并网前 | 并网后 |
|---|---|---|---|
| $F_1$故障 | 保护1测量电压/kV | 2.064 3 | 2.064 0 |
| | 保护1测量电流/A | 3.018 6 | 3.018 3 |
| | 保护1测量阻抗/Ω | 0.684 | 0.684 |
| $F_2$故障 | 保护1测量电压/kV | 7.915 5 | 9.654 3 |
| | 保护1测量电流/A | 2.438 2 | 2.459 2 |
| | 保护1测量阻抗/Ω | 3.246 5 | 3.925 8 |
| | 保护2测量电压/kV | 4.581 8 | 6.777 1 |
| | 保护2测量电流/A | 2.414 1 | 3.572 7 |
| | 保护2测量阻抗/Ω | 1.898 | 1.897 |

## 5 结束语

本文基于DIgSILENT建模仿真，通过仿真可以看出，光伏系统的接入对保护流过的短路电流会产生不同的影响。通过分析光伏并入配电网时对过电流保护和距离保护在发生故障时保护动作性能的影响，即过电流保护时，光伏并网点在发生故障点前，故障点位于并网点上游前一线路，保护不受影响；故障点位于并网点上游（除前一线路），由于光伏电源向故障点提供反向的故障电流，传统保护不具有方向性，有反向电流流过的保护在故障电流超过一定值后会引起保护的误动作。

光伏并网点在发生故障点后，位于光伏并网点下游的保护由于光伏电源提供的助增电流的影响流过保护的电流增大。位于光伏并网点上游的保护由于光伏系统的抑制作用导致流过保护的电流减小。

距离保护时，当光伏并网点从母线接入，在并网点下游发生故障且保护位于并网点上游时，保护将会受到影响，可能会使后备保护无法起到作用。

针对由于光伏系统接入不可避免地导致不能满足保护的灵敏性、选择性要求的问题，可考虑改进现有的保护或提出新的保护方案。

1）采用自适应保护方案，保护值通过系统的运行方式和故障类型进行实时调整，以增大保护范围，提高灵敏度。

2）采用基于通信技术的保护方案,如反映两端电气量比较的纵联差动保护。

### 参考文献

[1] 张家毓．光伏电源接入的配电网自适应距离保护研究[D]．吉林：东北电力大学，2018．
ZHANG Jiayu．Research on adaptive distance protection of distribution network accessed by photovoltaic power supply[D]．Jilin：Northeast Electric Power University，2018．

[2] HE J H，CHENG Y H，HU J H，et al．An accelerated adaptive overcurrent protection for distribution networks with high DG penetration[C]．13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP)，Edinburgh，2016：1-5．

[3] 许琴．基于DIgSILENT的分布式光伏系统对配电网线路保护的影响[J]．南方能源建设，2017，4(增刊1)：31-35．
XU Qin．Ressearch on the influence of distributed

photovoltaic system on distribution network protection using DIgSILENT[J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(Sup1): 31-35.

[4] 苏阔，王俊，丁浩．光伏并网对地区电网继电保护的影响[J]．吉林电力，2018，46(4)：22-24.
SU Kuo, WANG Jun, DING Hao. Effect of PV connected to grid on relay protection[J]. Jilin Electric Power, 2018, 46 (4): 22-24.

[5] 魏阳，张俊芳，汤士明，等．分布式电源接入对配电网距离保护和重合闸的影响研究[J]．现代电力，2014，31(3)：39-43.
WEI Yang, ZHANG Junfang, TANG Shiming, et al. Impact of the access of distributed generation on distance protection and reclosing of distribution network[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(3): 39-43.

[6] 孔祥平，张哲，尹项根，等．含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]．中国电机工程学报，2013，33(34)：65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggan, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis methods of power grids with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (34): 65-74.

[7] 王红燕，张丽珍．分布式电源接入对配电网继电保护的影响分析[J]．电气技术与经济，2018(5)：41-44.
WANG Hongyan, ZHANG Lizhen. Analysis of the impact of distributed generation access on the relay protection of distribution network[J]. Electrical Technology and Economy, 2018 (5): 41-44.

[8] 程金牛．计及风电分布式电源的配电网分区保护方案研究[D]．成都：西南交通大学，2012.
CHENG Jinniu. Study on zoning protection scheme for distribution network considering wind power distributed generation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[9] 刘宏亮，刘子勇，邢建军，等．多能互补集成优化在胜利油田推广应用的前景分析[J]．石油石化节能，2018，8(5)：39-41.
LIU Hongliang, LIU Ziyong, XING Jianjun, et al. Prospect analysis of multi-energy complementary integration optimization in Shengli Oilfield [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical, 2018, 8 (5): 39-41.

[10] 张君宇，林睿，陶维青．基于DIgSILENT的继电保护建模仿真研究[J]．电力系统保护与控制，2018，46(11)：62-67.
ZHANG Junyu, LIN Rui, TAO Weiqing. Study of relay protection modeling and simulation on the basis of DIgSILENT[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (11): 62-67.

**作者简介**

郭冰聪

郭冰聪（1996－），女，本科生，主要研究方向为电力系统分析与控制。

康忠健（1971－），男，博士，博士生导师，主要研究方向为电力系统分析与控制、电能质量分析与控制。

(收稿日期：2019－03－04)EA