

DOI: 10.7667/PSPC170758

# 基于 HHT 的微电网差分能量保护策略

田书, 孙永超, 周令

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 针对微电网双向潮流和并网/孤岛运行时故障电流差异大的特点, 在微电网差动保护的基础上, 提出了基于 HHT 变换的差分能量保护新方法。对故障线路两端电流进行时-频变换(HHT 变换)获得 Hilbert 谱, 并计算谱能量, 利用差分能量是否超出阈值判断是区内故障还是区外故障, 且不同故障类型阈值无需改变。在 PSCAD 中搭建 10 kV 微电网模型并在 Matlab 中进行算例验证。大量仿真表明此方法能够可靠检测出并网和孤岛两种运行状态下的各种故障, 而且有效解决了高阻抗故障(HIF)保护失效问题。

**关键词:** 微电网保护; Hilbert-Huang 变换; 谱能量; 高阻抗故障(HIF); 自适应

## Microgrid protection using Hilbert-Huang transform based-differential energy scheme

TIAN Shu, SUN Yongchao, ZHOU Ling

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** The study presents a new HHT-based method of differential energy protection on the basis of the microgrid differential protection, aiming at the features of microgrid bi-directional power flow and large difference in fault current when operating in grid-connected and islanded modes. Hilbert spectra are obtained by Hilbert-Huang Transform (HHT) of the currents at both ends of the faulty line, and the spectrum energy is calculated. Whether it is an intra-area or out-area fault can be decided by checking if the differential energy exceeds the threshold, without needing to change the thresholds of different fault types. A 10 kV microgrid model is set up in PSCAD and example validation is conducted in Matlab. A large number of simulations demonstrate that this method can reliably detect all kinds of faults under both grid-connected and islanding operation conditions and effectively solve the problem of High Impedance Fault (HIF) protection failure.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 61403127).

**Key words:** microgrid protection; Hilbert-Huang transform; spectral energy; high impedance faults (HIF); adaptive

## 0 引言

新能源发电具有灵活、经济与环保的优点, 但风能、光能的间歇性和随机性使得这些电源无法保证负荷的功率平衡。大规模、形式多样的分布式电源的可靠性运行问题亟需解决。在难以高效应用分布式发电技术的背景下, 微电网技术应运而生。目前国内已有多个大容量的微电网示范项目, 但将微电网作为成熟技术大规模推广应用之前, 必须解决微电网的保护问题<sup>[1]</sup>。并入分布式电源(DG)后改变了原有的单电源辐射结构, 致使微电网内潮流双向

流动。且逆变型分布式电源(IIDG)具有限流装置, 提供的短路电流小于额定电流的 1.5~2 倍。DG 随时接入和退出, 致使继电保护难以整定<sup>[2-4]</sup>。鉴于上述微电网的特点, 传统的三段式保护已不能满足要求<sup>[5]</sup>。

国内外对微网继电保护方面的研究已经取得了一定的成果, 文献[6-7]提出通过比较故障前后母线上测量导纳的幅值与相角的变化, 以构成区分区内与区外故障的有效判据, 但在高阻抗故障下(HIF)保护失效。文献[8]利用树形节点路径图描述微电网拓扑结构, 采用节点搜索方法及节点路径算法对微电网进行保护。但微电网的各种结构形式难以预先知道, 而且不同运行方式下的短路计算比较复杂。文献[9-11]提出了一种反时限低阻抗保护方案。此方案只能判定故障区域, 无法定位到具体的分支馈线, 导致故障切除范围扩大。文献[12]提出了双电流差

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(61403127); 河南省高等学校控制工程重点学科开放实验室项目资助(KG2016-19)

动保护判据,但对电流采样的同步性要求极高,由于同步获取多电流差动保护信号困难,常常导致保护误判。文献[13]使用一种改进型的 S 变换来提取线路两端电流的能量频谱,但此方法阈值难以整定。

本文采用时-频变换差分能量方法,通过 HHT 变换处理微电网中各馈线两端故障电流,用两信号的谱能量差(差分能量)来判断是否故障以及故障类型。与时域的差动电流方法相比采用能量变量对时间同步问题不敏感<sup>[14-15]</sup>。Hilbert-Huang 变换可有效处理微电网中非平稳信号,且无需预先确定基函数和窗口函数。采用差分能量可有效解决微电网中双向潮流、孤岛时故障电流小等难题,而且能够准确检测出 HIF 故障。仿真结果表明在并网和孤岛两种模式下都可满足保护选择性,速动性要求。

## 1 Hilbert - Huang 变换理论

采用 Hilbert-Huang 变换处理非平稳信号的过程是:首先利用 EMD 方法将给定的信号分解为若干个 IMF,然后对每个 IMF 进行 Hilbert 变换,得到相应的 Hilbert 谱。HHT 变换是一种新的非平稳、非线性信号分析方法,它可根据信号的局部时变特征进行自适应的时频分解,具有极高的时频分辨率。

### 1.1 经验模态分解(EMD)

经验模态分解是依据信号自身特点,自适应地把一个复杂信号分解为若干个固有模态函数(IMF)。IMF 满足两个条件:(1)信号极值点数量与零点数量必须相等或相差一个。(2)任意时刻,由局部极大值和极小值点形成的上、下包络线平均值为 0。

设信号  $x(t)$  上下包络线平均值为  $m$ ,原始信号减去  $m$  得到第一个 IMF,若满足 IMF 条件则为 IMF1,若不满足,重复上述过程直到分解出满足条件的 IMF 分量。EMD 具体分解过程参考文献[16-17]。

### 1.2 Hilbert 谱分析

信号  $x(t)$  经过 EMD 后分解为  $n$  个 IMF 分量,对 IMF 分量  $c_i(t)$  进行 Hilbert 变换构造解析信号

$$z_i(t) = c_i(t) + j\hat{c}_i(t) = a_i(t)e^{j\omega_i(t)} \quad (1)$$

其幅值函数为

$$A_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + \hat{c}_i^2(t)} \quad (2)$$

相位函数为

$$\theta_i(t) = \arctan \frac{\hat{c}_i(t)}{c_i(t)} \quad (3)$$

瞬时频率为

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi t} \arctan \frac{\hat{c}_i(t)}{c_i(t)} \quad (4)$$

省略  $r_n(t)$ ,原始信号  $x(t)$  可表达为

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt} \quad (5)$$

式(5)即信号  $x(t)$  的 Hilbert 谱,记作  $H(t, \omega)$ 。

### 1.3 Hilbert 谱能量

根据 Parseval 定理信号  $x(t)$  的时域能量和与频域能量和相等,即

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} H^2(t, \omega) d\omega \quad (6)$$

式中,  $H^2(t, \omega)$  称为能量密度,则每个固有模态函数的谱能量为

$$E_H = [A_i(t)]^2 \quad (7)$$

差分能量为

$$E_d = E_{H1} - E_{H2} \quad (8)$$

式中:  $E_{H1}$ 、 $E_{H2}$  为线路两端继电器中的谱能量;  $E_d$  为线路两端差分能量。

## 2 保护设计

与传统的配电网不同,微电网中多个微电源接入配电网中,存在潮流的双向流动问题,结构也不再是单一的辐射状,并网模式和孤岛模式下,短路电流差异很大,基于上述特点,微电网需要新的保护策略。采用 PSCAD 搭建典型的 10 kV 微电网结构<sup>[18-20]</sup>,如图 1 所示。

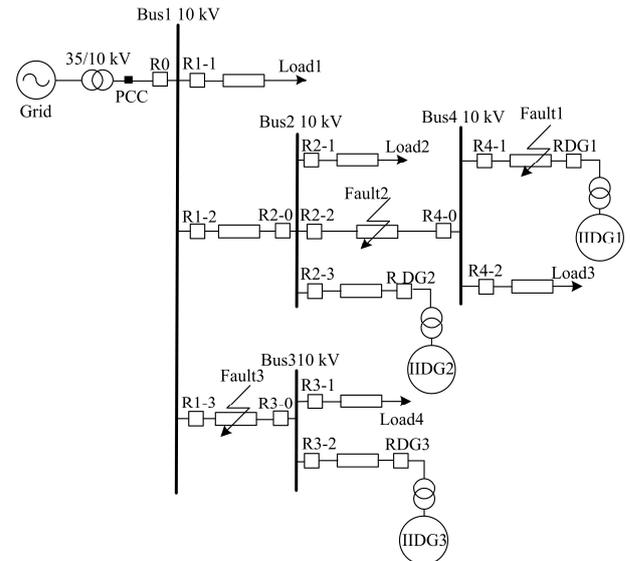


图 1 微电网简化模型

Fig. 1 Simplified model of microgrid

### 2.1 保护原理

采用基于 HHT 变换的微电网差分能量保护如图 2 所示。通过电流互感器获取馈线两端故障电流,分别进行 EMD 分解获取固有模态函数(IMF),对

IMF1 进行 Hilbert 谱分析, 然后计算谱能量。采用两端信号的谱能量差作为是否发生故障的判据。依据大量仿真数据设置合适的阈值, 当差分能量超过阈值发出跳闸信号, 断路器动作切除故障线路。图 3 为保护策略流程图。

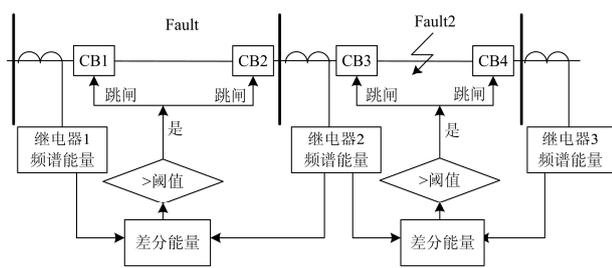


图 2 差分能量保护方案

Fig. 2 Differential energy protection scheme

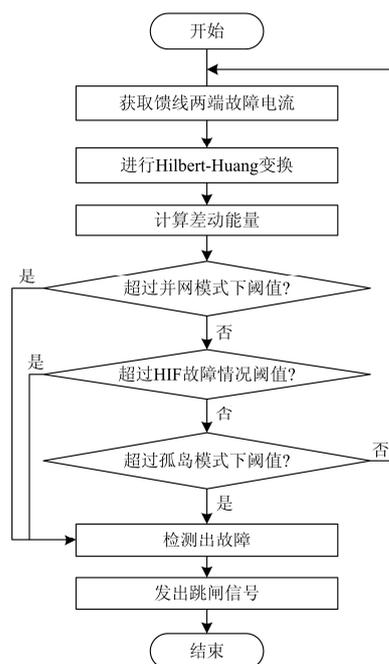


图 3 保护策略流程图

Fig. 3 Flow diagram of protection scheme

## 2.2 保护判据

从能量角度看在非故障情况下差分能量几乎为 0, 当发生故障时差分能量急剧升高, 设置合适的阈值, 把差分能量是否超过阈值作为本线路是否发生故障的判据。孤岛模式与并网模式下故障电流差异大, 两种模式下线路两端的差分能量有明显差异, 并网模式差分能量正向增长, 孤岛模式差分能量负向增长。这样清楚地区分故障是发生在并网模式下还是孤岛模式下。在 HIF 故障情况下故障电流本质是电弧电流, 差分能量处于较低值, 阈值设在较低的阈值带。三种情况下的阈值带无交叉, 互不冲突。

保护判据如式(9)一式(11)。

$$E_c > E_{i1} \quad (9)$$

$$E_h > E_{i2} \quad (10)$$

$$E_i < E_{i3} \quad (11)$$

式(9)为并网时的判据, 式(10)为 HIF 故障时的判据, 式(11)为孤岛时的判据。 $E_c$ 、 $E_i$ 、 $E_h$  分别是并网、孤岛、HIF 情况下的差分能量,  $E_{i1}$ 、 $E_{i2}$ 、 $E_{i3}$  是各自的阈值。

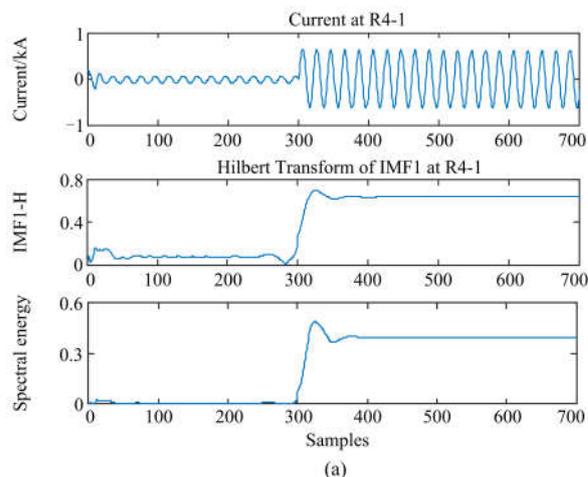
## 3 仿真与分析

在 PSCAD 软件中建立如图 1 所示的微电网模型, 10 kV 微电网经过 PCC 处并入 35 kV 配电网中, 电网频率为 50 Hz, 分布式电源均为逆变型微电源 IIDG, 有功功率分别为 400 kW、500 kW、300 kW, 最大短路电流分别设置为各自额定电流的 1.5、1.6、3 倍。Load1-Load4 均为三相负荷, 分别为 1 500+j60 kVA、1 200+j30 kVA、1 200+j30 kVA、1 200+j30 kVA。线路采用阻抗模型  $R=0.641 \Omega/\text{km}$ 、 $X=0.101 \Omega/\text{km}$ 。

### 3.1 算例 1: 并网模式

采样频率设置为 1 kHz, 一个周期采样 20 个点 (1.0 k/50), 仿真时长 1 s。PCC 处闭合处于并网模式, 0.3 s 时 F1 处发生单相接地故障, 在 Matlab 中进行算例仿真, 继电器 R4-1 和 RDG1 的故障电流、IMF1 的 Hilbert 变换、谱能量分别如图 4(a)、4(b)所示。大量仿真阈值可设置为 0.25, 在第 300 个采样点设置 L-G 故障, 采用 HHT 变换和 S 变换的差分能量算法, 分别在第 313 和 314 个采样点检测出故障, 发出报警信号, 如图 5 所示。

IIDG1、IIDG2、IIDG3 渗透率分别为 60%、60%、80%时, F3 处发生 AC 两相接地短路故障的采用 S 变换和 HHT 的差分能量如图 6(a)、图 6(b)所示。采用 HHT 变换方法, 阈值保持为 0.25, 在第 308 个采样点检测出 A、C 相差分能量超过设置阈值, 非故障



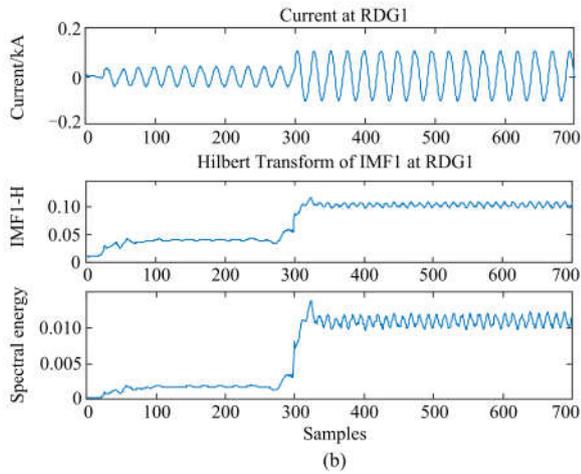


图4 F1处故障，故障电流、IMF1的 Hilbert 变换、谱能量  
Fig. 4 F1 fault, Hilbert transform and spectral energy of fault current and IMF1

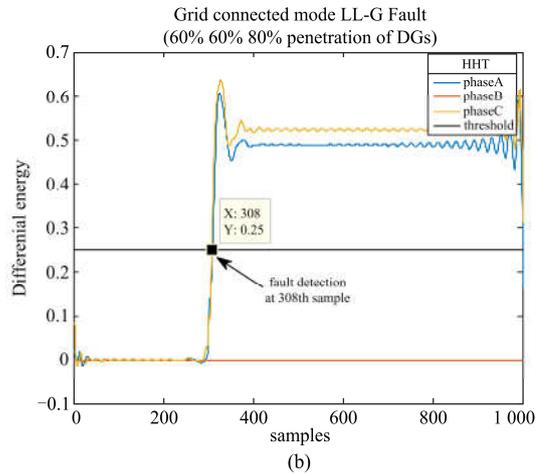


图6 并网时 F3处 LL-G 故障的差分能量  
Fig. 6 Grid connected mode, differential energy of the LL-G fault on F3

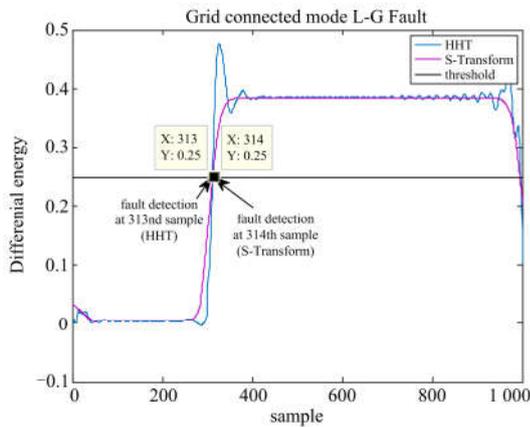
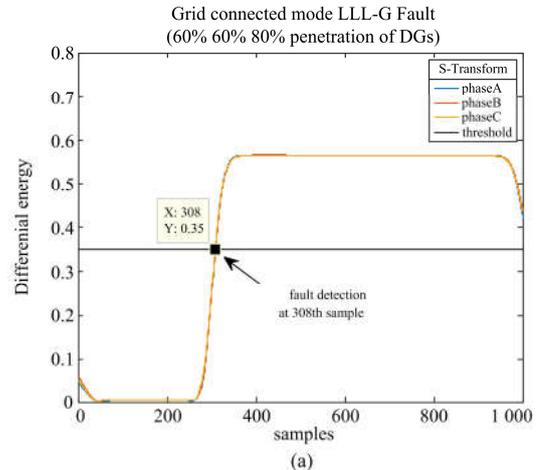
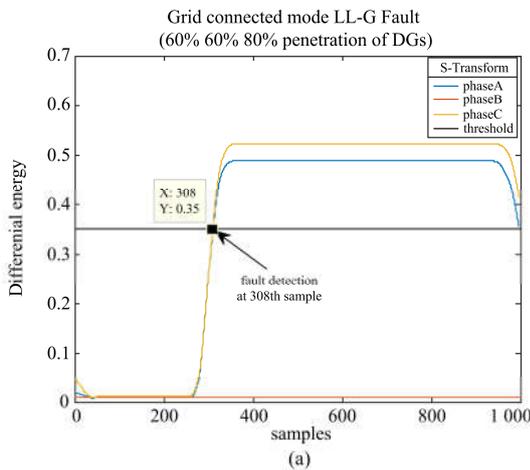


图5 并网时 F1处 L-G 故障的差分能量，阈值设为0.25  
Fig. 5 Grid connected mode, differential energy with the threshold being 0.25 for L-G fault on F1



相 B 相的差分能量为接近于0。而采用 S 变换在298个采样点差分能量已经达到0.25，明显不能满足要求，必须提高阈值，经大量仿真阈值可设为0.35，在308个采样点检测出为 A、C 相故障。

图7(a)、图7(b)为 F2处在第300个采样点发生 LLL-G 故障的差分能量，采用 S 变换阈值增加为0.35，在第308个采样点 A、B、C 三相差分能量都超过阈值。采用 HHT，阈值保持为0.25，307个采样点检测出故障，判断为并网情况下三相故障，并向断路器发出跳闸信号。

上述仿真可看出，在并网情况下改变 DG 渗透率，采用 S 变换需要调整阈值才能满足保护要求，而采用 HHT 变换，阈值具有自适应性无需改动。这是因为 IIDG1、IIDG2故障电流小于两倍额定电流，IIDG3是额定电流的3倍，而 S 变换存在高斯窗

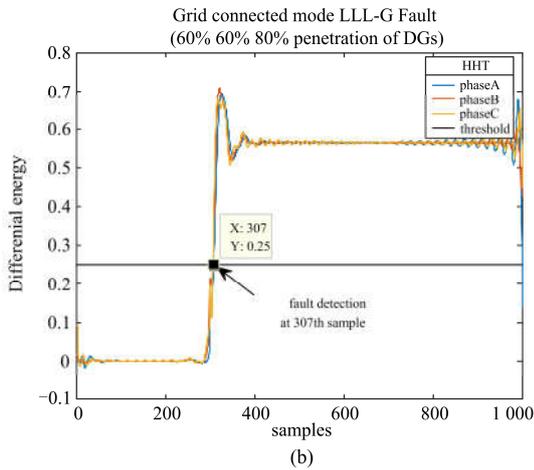


图 7 并网时 F2 处 LLL-G 故障的差分能量

Fig. 7 Grid connected mode, differential energy of the LLL-G fault on F2

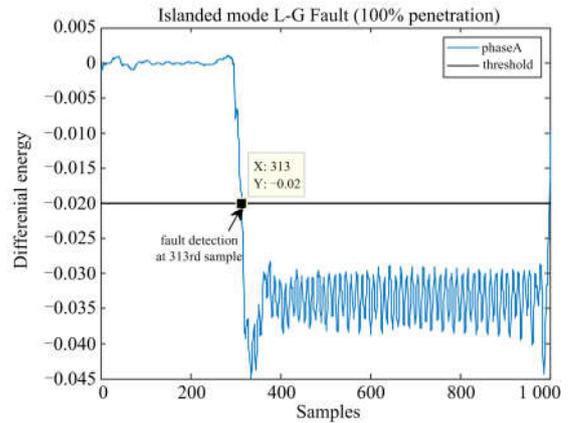


图 8 孤岛时 F1 处 L-G 故障的差分能量, 阈值设为-0.02

Fig. 8 Islanded mode, differential energy with the threshold being -0.02 for L-G fault on F1

口大小问题, 随着渗透率改变, 两类分布式电源提供的故障电流等级差异增大, 计算出的谱能量也会有差异, 将会影响阈值的设定。不同渗透率情况下对采用 HHT 和 S 变换微电网保护阈值的影响如表 1。

表 1 改变分布式电源渗透水平对阈值的影响

Table 1 Effect of change different penetration level on threshold

DG 渗透率	故障类型	故障时刻	阈值	HHT 阈值	S 变换	
100%DG1	L-G F1	300	0.25	313	0.25	314
100%DG2	LL-G F2	300	0.25	309	0.25	310
100%DG3	LLL-G F3	300	0.25	306	0.25	306
60%DG1	L-G F1	300	0.25	313	0.35	313
60%DG2	LL-G F2	300	0.25	308	0.35	308
80%DG3	LLL-G F3	300	0.25	307	0.35	308
60%DG1	L-G F1	300	0.25	314	0.4	315
60%DG2	LL-G F2	300	0.25	310	0.4	310
40%DG3	LLL-G F3	300	0.25	308	0.4	307

### 3.2 算例 2: 孤岛模式

当 PCC 处断开时, 进入孤岛模式, 0.3 s F1 处发生单相接地故障时, 在 Matlab 中进行算例仿真, 大量仿真阈值可设置为-0.02, 在第 300 个采样点设置 L-G 故障, 在第 313 个采样点检测出故障, 如图 8 所示。图 9 为 F3 处发生 LL-G 故障的差分能量, 阈值为-0.02, 在第 331 个采样点检测出 A、B 相差分能量超过阈值-0.02, 而非故障相 C 相的差分能量接近于 0, 判断为孤岛情况两相故障。图 10 为 F2 处发生 LLL-G 故障的差分能量, 阈值仍为-0.02, 在第 328 个采样点 A、B、C 三相电流都超过阈值。判断为三相故障, 并向断路器发出跳闸信号。

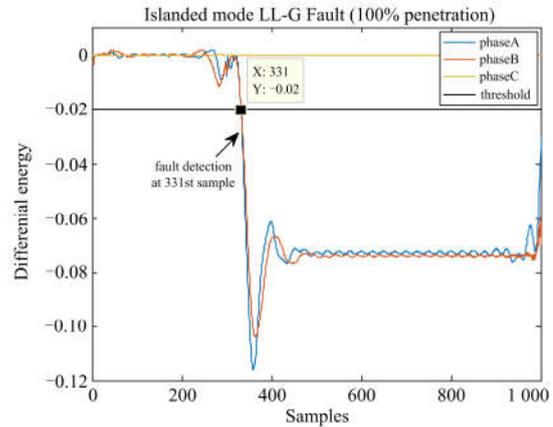


图 9 孤岛时 F3 处 LL-G 故障的差分能量, 阈值设为-0.02

Fig. 9 Islanded mode, differential energy with the threshold being -0.02 for LL-G fault on F3

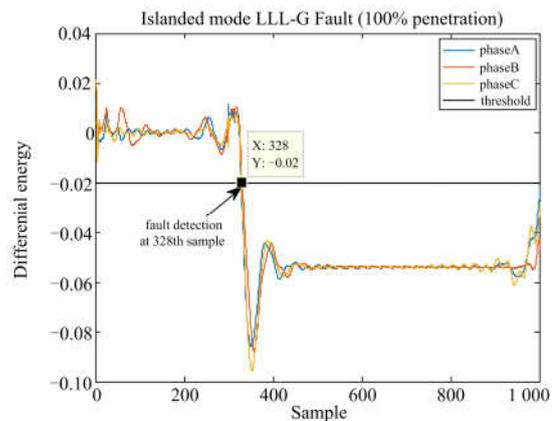


图 10 孤岛时 F2 处 LLL-G 故障的差分能量, 阈值设为-0.02

Fig. 10 Islanded mode, differential energy with the threshold being -0.02 for LLL-G fault on F2

### 3.3 算例 3: HIF 故障

一次侧发生接地故障时, 接地电阻很大, 致使故障电流很小, 称为高阻抗故障。传统保护难以检测出故障, 而采用本方法, 在 F3 处发生 HIF 故障时, 阈值设置为 0.015, 在第 312 个采样点检测出故障, 并向断路器发出跳闸信号, 如图 11 所示。

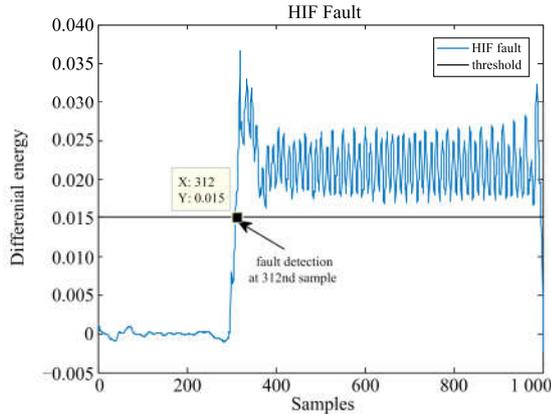


图 11 HIF 故障时的差分能量, 阈值设为 0.015

Fig. 11 HIF fault differential energy with the threshold being 0.015

### 3.4 对比分析

将本文基于 HHT 的差分能量保护新方法与传统差动保护、基于序分量法的保护和基于 S 变换差分能量保护方法进行对比。基于 S 变换的差分能量保护阈值不具有自适应性, 需依据渗透率不同改变阈值才可满足保护要求, 基于序分量的保护方法在 HIF 故障情况下失效, 而传统的差动保护方法在孤岛情况下保护失效, 结果如表 2 所示。

表 2 不同保护方法对比

Table 2 Comparison of different protections

故障类型	HHT	S 变换	序分量	差动保护
并网模式				
LG	✓	✓	✓	✓
LLG	✓	✓	✓	✓
LLLG	✓	✓	✓	✓
HIF	✓	✓	✗	✗
孤岛模式				
LG	✓	✓	✓	✗
LLG	✓	✓	✓	✗
LLLG	✓	✓	✓	✗
HIF	✓	✓	✗	✗

## 4 结论

采用基于 HHT 变换的差分能量保护方法, 在馈线两端检测到故障电流信号的谱能量, 使用差分能量是否超过阈值作为是否故障的判据。两种模式

的判据, 可清楚地区分故障发生在孤岛模式还是并网模式。而且在分布式电源渗透率不同的情况下所有故障类型的阈值无需改动。对难以检测的 HIF 故障也适用。通过仿真分析, 验证保护方案在并网模式、孤岛模式和 HIF 故障情况下的可行性和可靠性。

### 参考文献

- [1] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.  
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [2] 韩海娟, 牟龙华, 郭文明. 基于故障分量的微电网保护适用性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 90-96.  
HAN Haijuan, MU Longhua, GUO Wenming. Applicability of microgrid protection based on fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 90-96.
- [3] 李练兵, 张晓娜. 基于电流行波的微电网保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 94-100.  
LI Lianbing, ZHANG Xiaona. Protection scheme of microgrid based on current traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 94-100.
- [4] 赵俊瑞, 王占山. 微网故障特性分析及保护方法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(6): 913-922.  
ZHAO Junrui, WANG Zhanshan. Fault characteristics of microgrid and protection strategies[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(6): 913-922.
- [5] 刘科学, 宣文华, 魏少鹏, 等. 一种基于高级 Petri 网的微电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 106-111.  
LIU Kexue, XUAN Wenhua, WEI Shaopeng, et al. A method of micro grid fault diagnosis based on high-level Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 106-111.
- [6] 姜斌, 牟龙华. 基于母线测量导纳变化的微电网保护[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1751-1758.  
JIANG Bin, MU Longhua. Microgrid protection based on change of measured bus admittance[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1751-1758.
- [7] 康忠健, 田爱娜, 冯艳艳, 等. 基于零序阻抗模型故障特征的含分布式电源配电网故障区间定位方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 214-221.  
KANG Zhongjian, TIAN Aina, FENG Yanyan, et al. Fault section locating method based on zero sequence impedance model fault feature in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 214-221.

- [8] 贾清泉, 孙玲玲, 王美娟. 基于节点搜索的微电网自适应保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1650-1657.  
JIA Qingquan, SUN Lingling, WANG Meijuan. An adaptive protection method for micro-grid based on node searching[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1650-1657.
- [9] 黄文焘, 邰能灵, 杨霞. 微电网反时限低阻抗保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 105-114.  
HUANG Wentao, TAI Nengling, YANG Xia. Inverse-time low-impedance protection scheme for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 105-114.
- [10] 韩海娟, 牟龙华, 张凡. 考虑 IIDG 低电压穿越时的微电网保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 27(1): 110-119.  
HAN Haijuan, MU Longhua, ZHANG Fan. Microgrid protection considering low voltage ride-through of IIDG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 27(1): 110-119.
- [11] 童荣斌, 牟龙华, 庄伟. 微电网的有限区域集成保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 90-96.  
TONG Rongbin, MU Longhua, ZHUANG Wei. Finite area integrated protection of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 90-96.
- [12] 李倍, 和敬涵. 基于双电流差动保护的微电网保护新方案[J]. 电气应用, 2014, 33(21): 128-133.  
LI Bei, HE Jinghan. New scheme of microgrid protection based on double current differential protection[J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(21): 128-133.
- [13] SAMANTARAY S, JOOS G, KAMWA I. Differential energy based microgrid protection against fault conditions[J]. IET Gener, Transm and Distrib, 2014, 8(2): 310-320.
- [14] 李小鹏, 何正友. 基于 S 变换能量相对熵的高压输电线路极性比较式纵联保护[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2250-2256.  
LI Xiaopeng, HE Zhengyou. Polarity comparison pilot protection based on S-Transform energy relative entropy for high voltage transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2250-2256.
- [15] SAMANTARAY S R, DUBEY R K, TRIPATHY L N, et al. Spectral energy function for fault detection during power swing[C] // 2011 International Conference on energy, Automation and Signal in India, December 28-30, 2011, Bhubaneswar, Odisha: 1-6.
- [16] 田书, 寿好俊, 尚鹏辉. 基于 HHT 的谐振接地配电网暂态量故障选线研究[J]. 测控技术, 2017, 36(3): 14-19.  
TIAN Shu, SHOU Haojun, SHANG Penghui. Research on transient fault line selection in resonance grounding distribution network based on HHT[J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(3): 14-19.
- [17] 刘凯, 彭维捷, 杨学君. 特征优化和模糊理论在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 54-60.  
LIU Kai, PENG Weijie, YANG Xuejun. Method of fault diagnosis for power transformer based on optimizing characteristics and the fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 54-60.
- [18] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [19] 孙孝峰, 郝彦丛, 赵巍, 等. 孤岛微电网无通信功率均分和电压恢复研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 55-61.  
SUN Xiaofeng, HAO Yancong, ZHAO Wei, et al. Research of power sharing and voltage restoration without communication for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 55-61.
- [20] 芦思晨, 潘再平. 无储能风电微电网系统的下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 169-175.  
LU Sichen, PAN Zaiping. Droop control strategy of wind power microgrid system without energy storage device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 169-175.

收稿日期: 2017-05-20; 修回日期: 2017-08-07

作者简介:

田书(1963—), 女, 硕士, 教授, 硕导, 研究方向为电力系统运行与控制、微机保护; E-mail: tainshu@hpu.edu.cn

孙永超(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网保护与控制; E-mail: 364808972@qq.com

周令(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断。

(编辑 葛艳娜)