

[文章编号] 1003—4684(2020)01-0047-05

# 含电能质量调节功能的三相四线制光伏系统

皮琪力, 张长征

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对配电网中的谐波、无功、三相不平衡问题以及可再生能源发电需求,提出一种新型的三相四线制光伏系统。针对光伏阵列及储能介质采用一种新型的三电平 DC/DC 变换器,分析其控制方法、调制策略以及中点电位不平衡抑制方法。双向并网变流器采用三相四线二极管钳位三电平变换器,为实现电能质量调节及有功功率双向流动,提出一种改进型的指令电流运算方法。在理论分析基础上,利用 MATLAB/Simulink 对该光伏系统进行了建模仿真,验证了新方案的可行性及有效性。

[关键词] 光伏系统; 电能质量; 三电平; 三相四线

[中图分类号] TM922      [文献标识码] A

太阳能作为一种可再生清洁能源,如果能够得到充分利用,将有效缓解目前的环境和能源问题<sup>[1]</sup>。随着电力系统的发展,由于大量单相负载和分布式微电网的并网,配电网中存在着比较严重的谐波、无功以及不平衡电流,损耗大量电能,影响电力设备以及电力系统的安全稳定运行<sup>[2-3]</sup>。针对以上两个热点问题,研究了一种能够调节配电网电能质量的三相四线制光伏系统,将光伏发电和配电网电能质量调节两者有机地结合起来,在发展清洁能源的同时,对配电网的谐波、无功以及三相不平衡电流进行有效补偿,提升配电网的电能质量。

## 1 系统结构及工作原理

本文设计的三相四线制光伏系统(图 1)主要由分布式发电部分、分布式储能部分以及并网变流器部分组成。分布式发电部分采用 MPPT 控制技术,使光伏组件的发电率最大化<sup>[4]</sup>。分布式储能部分采用了一种能量综合管理控制策略,实现控制光伏系统并网变流器的工作状态以及储能部分的快速充放电。并网变流器部分采用三相四线制结构,实现与电网的能量交换以及对配电网的电能质量调节。其中分布式发电和分布式储能部分都采用了三电平 DC/DC 变换器与直流母线进行能量交换,以及直流母线的不平衡抑制,因此并网变流器不需要制定相应的策略来平衡直流侧中性点电压,从而简化了并网变流器的结构和控制策略,提高了与电网能量交换的效率以及对配电网的电能质量调节

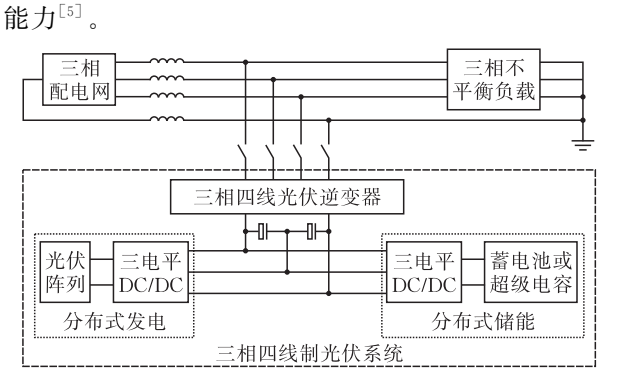


图 1 三相四线制光伏系统结构图

## 2 三电平 DC/DC 变换器

DC/DC 变换器是电能转换和传输的重要部件,其中两电平 DC/DC 变换器的容量较小、开关损耗较大,并不适合本系统发电和储能部分的要求<sup>[6]</sup>。因此本系统采用了一种新型的三电平 DC/DC 变换器,来满足大容量、高电压光伏系统的要求<sup>[7]</sup>。

### 2.1 DC/DC 变换器的结构及工作原理

系统采用的三电平 DC/DC 变换器拓扑结构(图 2)。该拓扑结构由一个三电平单元、输入端滤波电容  $C_f$ 、输出端两个电容器  $C_1$ 、 $C_2$  组成。这种三电平 DC/DC 变换器结构简单,稳定性高,可以满足分布式发电部分大容量、高电压的特点,也能够满足分布式储能部分快速充放电的要求<sup>[8]</sup>。而且变换器是模块化的,可以并联增大系统容量,具有很强的灵活性<sup>[9]</sup>。

通过改变四个开关管的工作状态,三电平 DC/

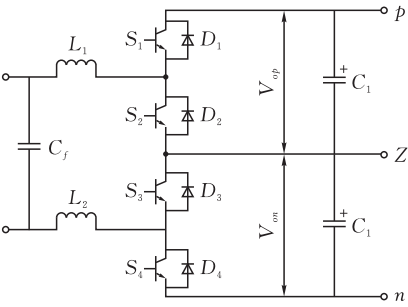


图 2 三电平 DC/DC 变换器主电路拓扑结构

DC 变换器可以实现四种工作模式。本文以开关管的导通编号对变换器的工作模式进行命名,例如当  $S_2$ 、 $S_3$  导通,  $S_1$ 、 $S_4$  没有导通时,变换器的工作模式就命名为 23 模式(图 3)。

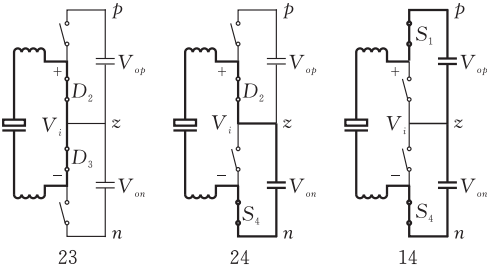


图 3 四种工作模式

三电平变换器的固有结构导致其存在中性点不平衡的问题,严重影响系统的正常运行<sup>[10]</sup>。本文所设计的三电平 DC/DC 变换器,可以在以上四种模式上转换。通过简单分析可知,当直流侧中性点不平衡时,只需要切换到 13 或者 24 工作模式,并使变换器工作在该模式持续一段时间,就可以调整中性点电压为平衡状态。

2.2 DC/DC 变换器的调制策略

根据三电平 DC/DC 变换器的拓扑结构,经对比分析,本文采用了多载波脉宽调制策略,具体如下:将两个调制波分别与两个相位相差 180 度三角载波信号相交,然后比较得出所需要的 PWM 波。利用这种调制方法,可以实现两个调制波的平衡,这也就实现了变换器的中性点电压平衡<sup>[11]</sup>。

本文  $d$  是主控占空比,  $d_1$  和  $d_4$  分别表示由控制器生成开关管  $S_1$ 、 $S_4$  导通的占空比值。通过与不平衡信号  $d_1$  和  $d_4$  进行调制,分别与反向的三角载波进行相交比较后得到变换器平衡的主占空比  $d$ 。在变换器中性点电压不平衡时,为了验证调制策略的正确性,需要分别考虑  $d > 0.5$ ,  $d = 0.5$ ,  $d < 0.5$  三种情况。

当  $d > 0.5$  时(图 4a),分别将调制信号  $d_1$  和  $d_4$  与反相的三角载波信号  $c_1$  和  $c_4$  比较,得到开关信号  $s_1$  和  $s_4$ ;然后根据开关信号的开通情况,可以判断出三电平变换器有 3 种工作模式 13、14、24,此时得

到不平衡时的输出电压波形  $V'_i$  和  $2V'_i$ 。最后将不平衡时的电压波形与平衡时的电压波形  $V_i$  和  $2V_i$  进行对比,就可以得出在此种情形下需要达到平衡,减少 13 工作模式导通时间即可。当  $d \leq 0.5$  时(图 4b),同样也可以通过相同的调制方法得到相应的开关管波形图。中性不平衡时的输出的电压波形为 0 和  $V'_i$ ,与平衡时的输出电压波形对比可以知道,减少 13 的导通时间可以调节中性点平衡。

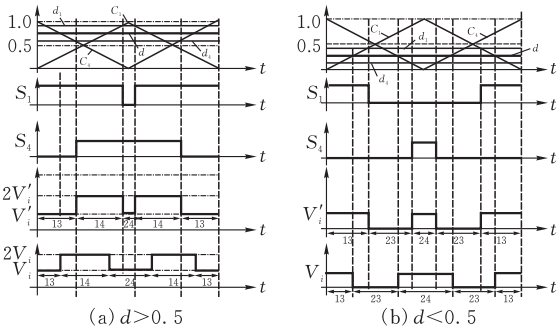


图 4 开关信号波形

2.3 DC/DC 变换器的控制方法

结合 DC/DC 变换器拓扑结构以及采用的调制策略,本文根据实际情况,采用了电压外环、电流内环的双闭环控制策略。其中电压外环用于保持直流母线的电压于稳定状态,实现无电压差,电流内环实现实时的响应,提升整个系统的响应速度。下面分别对分布式储能和分布式发电部分中的三电平 DC/DC 变换器的控制方法进行说明。分布式储能部分的双环控制如图 5 所示。

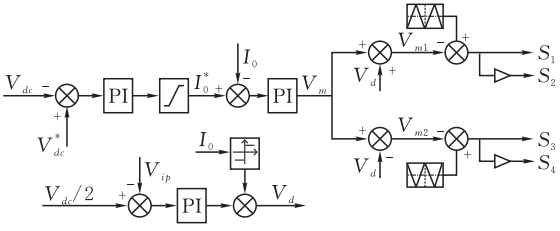


图 5 控制结构框图

由于储能部分有充电和放电两种工作状态,与母线之间的能量是双向流动的,需要通过检测蓄电池的端电流,来采取不同的控制策略。母线电压  $V_{dc}$  经 PI 调节后可以得到电流的标准值  $I_0^*$ ,然后将采样电流值  $I_0$  与电流标准值  $I_0^*$  做差运算,再经过 PI 调节就可以得出控制偏差信号  $V_m$ 。采集电压  $V_{ip}$  与变换器设定的标准电压  $\frac{V_{dc}}{2}$  比较,经过 PI 调节后,就可以得到中心点的偏差信号  $V_d$ 。最后将  $V_d$  与  $V_m$  比较后的差值分别与两个相位相差 180 度的三角载波相交,比较得出 PWM 调制开关信号,从而实现对变换器开关管的控制。分布式发电部分的控制方法与分布式储能模块放电状态下的控制方

法大致相同,只需要另外加入对光伏阵列的 MPPT 控制即可,不再赘述。

### 3 三相四线并网变流器

前文分析了三电平 DC/DC 变换器的中性点不平衡抑制能力,本文所设计的三相四线并网变流器不需要再考虑直流侧中性点不平衡问题。因此,本系统在单个三电平单元的基础上,研究设计了一种二极管钳位型三相四线并网变流器。

#### 3.1 并网变流器的拓扑结构及工作原理

拓扑结构(图 6)由三个二极管钳位的三电平桥臂、两个直流侧电容器  $C_1$ 、 $C_2$ 、输出连接电感  $L_s$  组成,其中  $R_s$  为三相线路的等效电阻,  $R_N$  为中线的等效电阻,每个桥臂都可以独立控制,都可以独立地工作在三种工作状态,输出的相电压分别为  $U_{dc}/2$ 、0 和  $-U_{dc}/2$  [12]。

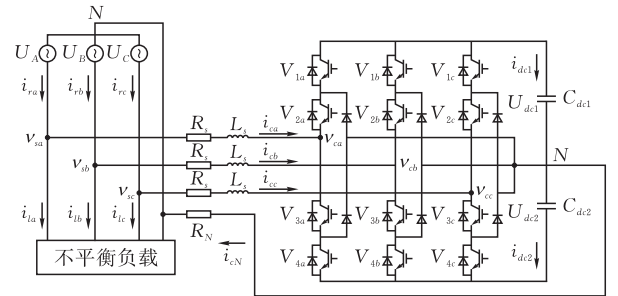


图 6 三相四线制并网变流器主电路拓扑结构

三相四线并网变流器采用电流控制方式,通过调节输出电流与电网电压的频率和相角相同,使得光伏系统发出的有功功率并入电网。通过合理的控制方案可同时实现并网和电能质量调节两个功能。具体而言,就是通过检测负载交流母线上的无功、谐波和不平衡电流分量,再通过一定的算法将其换算成补偿电流的指令信号,最后与并网变流器所需要向电网注入的有功电流指令信号相合成,从而得到最终的并网电流指令信号,这样就实现了利用一套并网装置集成光伏并网发电和电能质量调节两种功能。

#### 3.2 指令信号运算

通过前文分析可知,光伏系统同时实现光伏发电和电能质量调节的关键就是要得到集成逆变有功电流和不平衡补偿电流的并网电流指令。传统上,实现三相不平衡补偿,通常采用零序电流分离法 [13]。首先分析三相四线制系统中的零序电流,三相四线制系统中的三相电流为  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ ,其中 a、b、c 三相的零序电流分量相等,因此整个系统中总的零序电流

$$i_0 = \frac{(i_a + i_b + i_c)}{3}$$

各相中的零序分量  $i_0$  去除,则:

$$\begin{cases} i'_a = i_a - i_0 \\ i'_b = i_b - i_0 \\ i'_c = i_c - i_0 \end{cases}$$

零序电流分量去除后的三相电流只含有正序分量和负序分量,可以表示如下:

$$\begin{cases} i'_a = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ I_{n+} \sin(\omega t + \varphi_{n+}) + I_{n-} \sin(n\omega t + \varphi_{n-}) \right] \\ i'_b = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ I_{n+} \sin\left(\omega t + \varphi_{n+} - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{n-} \sin\left(n\omega t + \varphi_{n-} + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ i'_c = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ I_{n+} \sin\left(\omega t + \varphi_{n+} + \frac{2\pi}{3}\right) + I_{n-} \sin\left(n\omega t + \varphi_{n-} - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{cases}$$

同时又有:

$$i'_a + i'_b + i'_c = 0$$

现在利用基于瞬时无功功率理论的  $i_p$ 、 $i_q$  检测方法进行检测,可以得到基波的正序分量如下式:

$$\begin{cases} i'_{a1f} = \sqrt{2} I_{1+} \sin(\omega t + \varphi_{1+}) \\ i'_{b1f} = \sqrt{2} I_{1+} \sin\left(\omega t + \varphi_{1+} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i'_{c1f} = \sqrt{2} I_{1+} \sin\left(\omega t + \varphi_{1+} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

用负载电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  减去基波正序电流分量,就可以得到补偿指令电流信号,补偿信号包含无功功率、谐波、基波负序电流和基波零序电流,补偿信号用  $i_{ar}$ 、 $i_{br}$ 、 $i_{cr}$  表示,其关系可见下式:

$$\begin{cases} i_{ar} = i_a - i'_{a1f} \\ i_{br} = i_b - i'_{b1f} \\ i_{cr} = i_c - i'_{c1f} \end{cases}$$

由于本系统还要实现光伏并网的基本功能,所以需要比上述指令算法多考虑一个并网变流器直流侧电压稳定性的问题 [14]。因此,在有功电流经 LPF 滤波后加入了一个反馈环节,对逆变装置直流侧电压进行了稳定控制。指令信号运算电路见图 7。

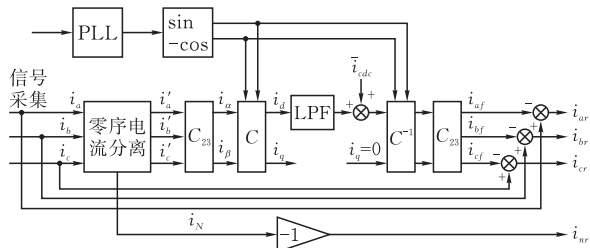


图 7 指令信号运算电路

### 4 建模与仿真

根据上述调制策略及控制原理,对整个三相四

线制光伏系统进行建模与仿真。其中,直流母线电压为 1200 V,光伏组件最大电压为 500 V,蓄电池端电压为 600 V。图 8 是分布式发电部分经过 MPPT 算法后的输出电压,可以看出 0.05 s 之后光伏电池输出电压  $V_{ref}$  稳定在 500V,MPPT 算法正确有效。

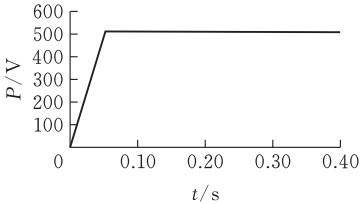


图 8 分布式发电 MPPT 控制

图 9 是对本系统分布式储能部分的能量双向流动的仿真。可以看出,在 0.1 s 前  $P_{\text{负载}} = P_{\text{母线}} + P_{\text{电池}}$ ,母线电源和储能部分共同为直流负载提供电能,蓄电池为放电状态。0.1 s 后  $P_{\text{母线}} = P_{\text{负载}} + P_{\text{电池}}$ ,母线电源为直流负载和储能部分一起供能,储能部分处于充电状态。因此分布式储能部分可以实现能量的双向流动。

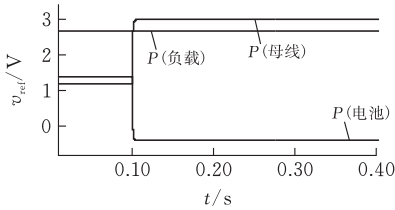


图 9 蓄电池、负载和母线的功率

图 10 是对三电平 DC/DC 变换器中性点电压的仿真分析,可以看出初始状态下中性点电压不平衡,但是在 0.1 s 时采取双闭环控制法后,中性点电压在短时间内达到平衡,中性点不平衡抑制有效。

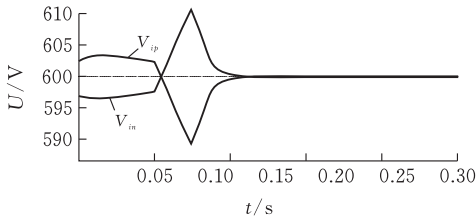


图 10 三电平 DC/DC 变换器中性点电压

图 11 是光伏系统对配电网的无功补偿、不平衡补偿以及谐波治理的仿真分析,可以看出,初始时配电网 A 相电压和电流不同相位,而且存在谐波和不平衡电流,在 0.1 s 时,并入光伏系统,配电网电压、电流变为同相位,并且三相电流变为标准的三相交流电。

图 12 是对微电网与配电网有功交换的仿真实验。0.2 s 前微电网处于独立状态,电网电流仅由三相负载值决定。0.2 s 到 0.3 s,微电网将多余的能量

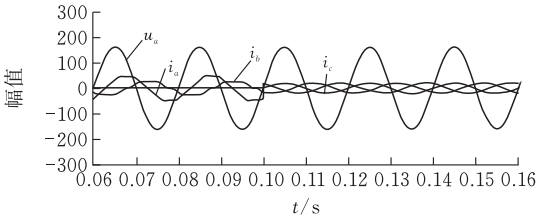


图 11 补偿前后配电网的电压、电流波形

并入配电网,配电网三相电流增大。0.3 s 到 0.4 s,微电网从配电网获取能量,配电网三相电流减小。

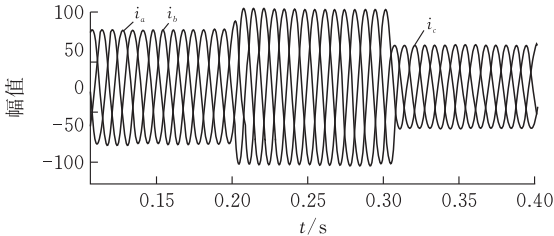


图 12 配电网的三相电流波形

5 结论

本文所研究的三相四线制光伏系统在发电和储能部分采用了一种新型的三电平 DC/DC 变换器,并提出了中性点抑制的调制策略和控制方法。在并网部分采用了一种新型三相四线并网变流器,并提出了相应的控制方法,实现了与配电网双向有功交换的同时,对配电网的无功、谐波以及不平衡负载进行补偿,提升了电网电能质量。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 2-14.

[2] Blaabjerg F, Yang Y, Yang D, et al. Distributed power-generation systems and protection[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1-21.

[3] 左向红,陈斌,张啸宇,等. 分布式发电系统电能质量评估指标研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(4): 99-104.

[4] 潘金生,李梦佳,刘秀杰,等. 分布式光伏电源接入对配电网电能质量的影响[J]. 山东电力技术, 2018, 45(09): 26-29.

[5] Chen H C, Liao J Y. Modified interleaved current sensorless control for three-level boost pfc converter with considering voltage imbalance and zero-crossing current distortion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 1-1.

[6] Yaramasu V, Bin W. Predictive control of a three-level boost converter and an NPC inverter for high-power PMSG-based medium voltage wind energy conversion systems [J]. IEEE Trans. Power Electron. 2014, 10



(29):5308 - 5322

[7] 魏晓光,王新颖,高冲,等.用于直流电网的高压大容量 DC-DC 变换器拓扑研究[J].中国电机工程学报,2014,(34): 218-225

[8] 赵成勇,李路遥,翟晓萌,等.新型模块化高压大功率 DC-DC 变换器 [J].电力系统自动化,2014, 38(4): 72-78.

[9] 袁艺佳,许建中,赵成勇,等.一种新型模块化多电平 DC-DC 变换器[J].华北电力学报,2015, 42(4): 8-15.

[10] 任强,肖飞,孙驰,等. 新型模块化多电平 DC-DC 变换器拓扑及其工作机理分析[J]. 电力系统自动化,2017, 41(10):141-147.

[11] Dawidziuk J. Review and comparison of high efficiency high power boost DC/DC converters for photovoltaic applications[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences,2016,59(4):35-40.

[12] 赵成勇,李路遥,翟晓萌,等. 基于三电平逆变器的有源电力滤波器研究[J].电力系统自动化,2014, 38(4): 72-78.

[13] Rivera S, Wu B, Wang J, et al. Electric vehicle charging station using a neutral point clamped converter with bipolar DC bus and voltage balancing circuit[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2013.

[14] 庞庆,彭琪,余祥,等. 三相四线制 APF 谐波检测和控制策略的研究[J]. 电力电子技术, 2018, 307(6):102-106.

## Three-phase Four-wire Photovoltaic System with Power Quality Condition Function

PI Qili,ZHANG Changzheng

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan,43000,China)

**Abstract:** In this paper, a novel three-phase four-wire photovoltaic system is proposed for the compensation of harmonic, reactive and three-phase unbalance in the distribution network and the demand for renewable energy generation. A novel three-level DC/DC converter is adopted for photovoltaic arrays and energy storage, and its control method, modulation strategy and neutral-point potential imbalance suppression method are provided. Three-phase four-wire diode-clamped three-level converter is adopted for the bi-directional grid-connected converter. In order to realize power quality condition and active power bidirectional flow, an improved reference current calculation method is proposed, and the grid-connected current tracking control method is analyzed. Based on the theoretical analysis, the photovoltaic system is modeled and simulated by MATLAB/Simulink, which verified the feasibility and validity of the novel scheme.

**Keywords:** photovoltaic system; power quality; three levels; three-phase four-wire

[责任编辑: 张岩芳]

(上接第 46 页)

## Research on Fault Location of Transmission Line Based on EEMD and TEO

AI Xuanyuan<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>, TAN Chang<sup>2</sup>

(1 School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;  
2 State Grid Ezhou Power Supply Company,Ezhou 436000, China;  
3 State Grid Hubei Maintenance Company, Wuhan 430050, China)

**Abstract:** To solve the problem of fault location of transmission lines is a prerequisite for ensuring safe and reliable transmission of electrical energy. In this paper, a novel fault location method, EEMD-TEO algorithm, which is able to overcome the problem of wavelet transform selecting wavelet basis function and decomposition scale and avoid the modal aliasing phenomenon of EMD, is proposed. The model of the power supply system on MATLAB/SIMULINK is first built and the fault is set. The fault signal is then extracted for analysis. Finally, the analysis of the experimental results show that EEMD-TEO can achieve accurate fault effect.

**Keywords:** fault location;EEMD-TEO;transmission line;MATLAB/SIMULINK

[责任编辑: 张岩芳]