

分布式光伏发电对配电网供电电压的影响研究

翟文杰, 李建泉, 吴小云, 管仁德, 崔 坚

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 分布式光伏发电并入配电网后将产生诸多影响。文章分析了分布式光伏发电接入放射式配电网前后负荷节点的电压分布特性, 研究了分布式光伏发电输出功率变化引起电压波动的分析方法、评价指标以及接入不同位置对馈线电压变化的影响, 进行了分布式光伏发电接入配电网的仿真, 总结了分布式光伏发电接入配电网的运行特性。

关键词: 分布式光伏发电; 配电网; 电压分布; 电压波动

中图分类号: TM615; TM714.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)04-0043-05

Research on Impact of Distributed Photovoltaic Generation on Voltage in Distribution Network

ZHAI Wen-jie, LI Jian-quan, WU Xiao-yun, GUAN Ren-de, CUI Jian

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It will bring a lot of impacts when grid-connected distributed photovoltaic generation on distribution network. This paper describes the voltage profile in radial distribution network within distributed photovoltaic generation, conducts a study on the analytical methods and evaluation index of voltage fluctuations caused by the output power variation of distributed photovoltaic generation, as well as the impact of feeder voltage profile when distributed photovoltaic generation parallels on different locations. The simulation of distribution network grid-connected distributed photovoltaic generation was provided to demonstrate its operating characteristics.

Key words: distributed photovoltaic generation; distribution network; voltage profile; voltage fluctuation

0 引言

近年来, 太阳能光伏发电因太阳能资源分布广、建设周期短, 在可再生能源应用中的比重逐渐增大。其中, 接入中低压配电网的分布式光伏发电(Distributed Photovoltaic Generation, 以下简称PV), 因其位于用户附近、配置灵活、可降低网损、能提高供电可靠性等特点, 具有较高的经济效益和社会效益。为此, 财政部等部门于2009年联合出台了促进国内分布式光伏发电应用的“金太阳”工程政策^[1]。

PV引入配电网后, 使配电系统发生了根本性的变化^[1-2]: 从一个放射式无源网络变为分布有中小型电源的有源网络。基于PV的输出功率具有间歇性、波动性的特点, 从而使配电系统的控制和管理变得更加复杂。其影响主要有: (1) 配电网的规划、运行(如无功补偿、电压控制、继电保护配合等)彻底改变; (2) 配电网自动化系统和需求侧管理的内容和方法也需要重新加以考虑; (3) PV等分布式电源之间的控制和调度必须加以协调; (4) 与PV等分布式发电有关的法律、法规和行业规范需要妥善制定。因而, 含PV等分布式电源的配电系统研究已成为电力科学研究的重点之一。

本文开展PV对配电网稳态电压分布的影响机理和电压变化的规律的分析与研究。基于放射式中低压配

收稿日期: 2013-04-10

作者简介: 翟文杰(1981-), 男, 研究方向为光伏发电技术及工程。

电网络、恒功率静态负荷模型和恒功率PV电源,结合算例仿真,分析PV并网对配电网稳态电压分布和电压波动影响的一般规律。

1 配电网、负荷和分布式PV

配电网的拓扑结构类型比较多,主要包括放射式接线、树干式接线和环网式接线,其形式主要取决于对供电可靠性的要求。我国城乡配电系统大多采用放射式结构,因为这种结构具有接线可靠、保护整定容易、扩充容易等优点。

配电网中的负荷种类繁多,随机性大,包括线性负荷、非线性负荷以及冲击负荷等,较难准确地对负荷加以描述。为便于研究,本文采用恒功率静态负荷表示馈线上各节点的负荷,并假设负荷三相对称。因中低压配电网电压等级不超过10 kV,配电线路长度一般不超过15 km,可以不予考虑三相线路互感。

文中的PV是指位于用户附近,所发电能就地利用,以10 kV及以下电压等级接入电网,且单个并网点总装机容量不超过6 MW的光伏发电电源。正常运行情况下,其运行特性与恒功率电源运行特性相近。

2 对稳态电压分布的影响

单个PV接入的配电网结构如图1所示。馈线上有 M 个节点,以系统电压 U_0 为参考电压。第 m 节点的电压为 $U_m(m=1, 2, \dots, M)$,负荷复功率为 $\tilde{S}_m=P_m+jQ_m$,第 m 条线路的阻抗为 R_m+jX_m 。考虑1个PV在 $p(1 \leq p \leq M)$ 节点并网,输出功率为 $\tilde{S}_{PV}=P_{PV}+jQ_{PV}$,并网点称为POC(point of coupling)点。

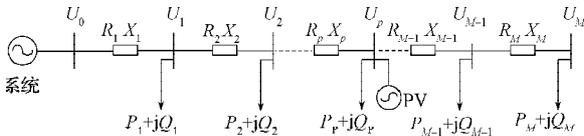


图1 放射式配电网

Fig. 1 Radial distribution system

传统配电网在稳态运行状态下,沿馈线潮流方向电压逐渐降低,电压分布情况由潮流分布决定。如果电源注入功率或负荷消耗功率发生变化,则各节点的稳态电压将相应变化,产生电压波动或甚至闪变。PV本身的启停、输出功率波动将影响配电网的供电电压质量。PV发电量通常不稳定,输出功率受日照和温度变化影响,甚至会出现频繁启停的情况。尽管按有关规定,PV不应主动参与配电网电压调节^[3],但PV的接入必然会引起馈线中传输功率的大小和方向发生变化,进而影响各节点的稳态电压分布^[4-5]。

2.1 PV接入前稳态电压分布

配电网中馈线上各节点的电压向量图如图2所示,其中, δ 为第 $(m-1)$ 节点和第 m 节点电压向量的相角差, dU 、 ΔU 、 δU 分别为节点电压变化量及其横向分量、纵向分量,第 m 段线路末端输送的功率为 $\sum_{i=m}^M (P_i+jQ_i)$ 。功率方向以节点流向用户为正,反之则为负。

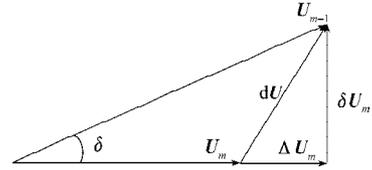


图2 电压变化向量图

Fig. 2 Vector diagram for voltage variation

为便于分析,令 $U_m=U_m$,则:

$$U_{m-1} = U_m + dU = U_m + \Delta U_m + j\delta U_m \quad (1)$$

$$\Delta U_m = \frac{\sum_{i=m}^M P_i R_m + \sum_{i=m}^M Q_i X_m}{U_m} \quad (2)$$

$$\delta U_m = \frac{\sum_{i=m}^M P_i R_m - \sum_{i=m}^M Q_i X_m}{U_m} \quad (3)$$

对于电力线路,一般有 $U_m + \Delta U_m > \delta U_m$,即可不考虑电压变动的垂直分量,而有:

$$\Delta U_m = U_{m-1} - U_m \quad (4)$$

因用户消耗的有功功率 P_m 和无功功率 Q_m 均为正值,所以 $\Delta U_m > 0$,即所有线路压降均大于0, $U_{m-1} > U_m$,馈线上的各节点越靠近末端,节点电压越小,第 m 个节点的电压为:

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \Delta U_i = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=i}^M P_j R_i + \sum_{j=i}^M Q_j X_i}{U_i} \quad (5)$$

2.2 PV接入后稳态电压分布

2.2.1 POC点及其以前各节点电压变化

当 $0 < m \leq p$ 时,经由线路传输的功率将减少 $P_{PV}+jQ_{PV}$ 。因PV运行在最大功率点,输出功率因数为1,所以 $Q_{PV}=0$,由公式(5)得 m 节点电压为:

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\left(\sum_{j=i}^M P_j - P_{PV}\right) R_i + \sum_{j=i}^M Q_j X_i}{U_i} > U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=i}^M P_j R_i + \sum_{j=i}^M Q_j X_i}{U_i} \quad (6)$$

由公式(6)可知,PV并网后整体提升了各节点电压水平,提升幅度与PV出力及其接入位置、线路参数、负荷大小有关。节点 m 电压变化量为:

$$\Delta U_m = \frac{\left(\sum_{i=m}^M P_i - P_{PV}\right) R_m + \sum_{i=m}^M Q_i X_m}{U_m} \quad (7)$$

对于接入中低压配电网的PV而言,负荷功率因数一般较高,供电范围内线路 R/X 较大,通常在1~3之间^[6],适当简化后的电压变化量可写为:

$$\Delta U_m = \frac{\left(\sum_{i=m}^M P_i - P_{PV}\right)R_m}{U_m} \quad (8)$$

由公式(8)知,当 $\sum_{i=m}^M P_i > P_{PV}$ 时,即节点 m 及其以后所有负荷有功功率大于PV的输出功率时, $U_{m-1} > U_m$,节点电压降低;当 $\sum_{i=m}^M P_i < P_{PV}$ 时,即节点 m 及其以后所有负荷有功功率小于PV输出功率时, $U_{m-1} < U_m$,节点电压升高。

2.2.2 POC点后各节点电压变化

即当 $p < m \leq M$ 时, m 节点电压:

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^p \frac{\left(\sum_{j=i}^M P_j - P_{PV}\right)R_i}{U_i} - \sum_{i=p+1}^m \frac{\sum_{j=i}^M P_j R_i}{U_i} > U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=i}^M P_j R_i}{U_i} > 0 \quad (9)$$

由公式(9)知,POC点后节点电压升高,节点 m 电压变化量为:

$$\Delta U_m = \frac{\sum_{i=m}^M P_i R_m}{U_m} > 0 \quad (10)$$

由公式(10)知,POC点后节点电压变化量依然为正值,自馈线首段至末端各节点电压逐渐降低。

综上所述,单个PV接入配电网后,将提升所在馈线上各节点电压水平,其中POC点可能成为局部电压最高点。从馈线首端向末端看去,各节点电压将有以下3种分布状态:逐渐降低;先降低后升高再降低;先升高后降低。后两种状态中,POC点电压为局部电压最高点。

3 引起的电压波动

电压波动是指电压均方根值一系列的变动或连续的改变,通常以额定电压的相对百分数来表示电压变动值,相对电压变动值为(此处不包括电压频率及相位的变化):

$$d = \frac{|dU|}{U_N} \times 100\% \quad (11)$$

若 $|dU|$ 为稳态或动态电压均方根值与 U_N 之差,则可得相对稳态或动态电压变动值。IEC相关标准指出:在低压民用电网中,相对稳态电压变动值不超过3%,相对动态电压变动值超过3%的持续时间不应超过200ms,相对最大电压变动值 d_{\max} 不应超过4%。

PV并网后改变了所在馈线各节点的电压水平,本节以POC点作为电压波动的评估点,定性分析PV并网

前后POC点的电压变化趋势及其主要影响因素。稳态运行情况下,并网PV可看做一阻抗为 Z_{PV} 的负荷,并网等效电路如图3^[7]所示。

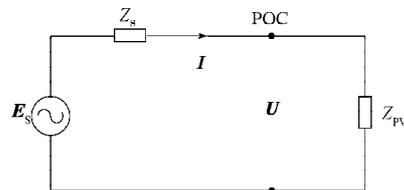


图3 PV接入点等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of distributed photovoltaic generation at POC

图中, E_s 为系统等效电势; $Z_s=R_s+jX_s$ 为从POC点看系统侧的等效阻抗; U 为POC点电压; I 为馈线电流,PV输出功率的变化,将引其 I 的变化。设PV输出功率变化量为 $\Delta \tilde{S}_{PV} = \Delta P_{PV} + j\Delta Q_{PV}$,电流变化量为 $dI = \Delta I + j\Delta I$ 。则POC点的电压变化量为:

$$dU = dI \times Z_s = |dI| |Z_s| e^{j(\varphi+\theta+\alpha)} = \frac{|\Delta \tilde{S}_{PV}|}{U} \frac{U_N^2}{S_d} e^{j(\varphi+\theta+\alpha)} \quad (12)$$

式中: S_d ——POC点系统侧短路容量; φ ——从POC点看系统侧的电网阻抗角; θ ——PV输出功率因数角; α ——电压相位角。

因电力线路两端的相角差一般很小,忽略 dU 的垂直分量;为便于分析,取 $\alpha=0$;另一方面,配电网中各节点实际电压一般在 U_N 允许的偏差范围内, $U \approx U_N$,PV单位功率因数运行于最大功率点,则电压变化量可写成:

$$dU = \Delta U = \frac{\Delta P_{PV}}{S_d} U_N \cos \varphi \quad (13)$$

则相对电压变动值为:

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} = \frac{\Delta P_{PV}}{S_d} \cos \varphi \times 100\% \quad (14)$$

配电网给定,则其阻抗角 $\cos \varphi$ 恒定。由式(14)可知,单个PV并网引起的电压变动大小主要与两个因素有关:输出功率和POC点处的系统短路容量。若接入位置给定,系统短路一定,则PV输出功率越大,POC点的相对电压变动也越大;若PV输出功率恒定,则接入位置越靠近所在馈线末端,即系统短路容量也越小,POC点的相对电压变动值越大。进而也从另一方面说明,PV应尽可能维持高功率因数运行,减少或避免无功出力(而由无功补偿装置提供无功时,即使PV退出运行,配电网也不会因无功缺额增大而加剧电压波动)。因此各个国家和地区对分布式电源功率因数均有要求,如美国部分地区要求功率因数在 $[-0.9, +0.9]$ 之间^[9],我国国家电网公司企业标准中也规定根据不同的负载率PV功率因数应在 $[-0.95, +0.95]$ 之间。

显然,PV投入至满功率运行时,POC点处的相对电

压变动有最大值:

$$d_{\max} = \frac{P_{\text{PV}}}{S_d} \times \cos\varphi \times 100\% \quad (15)$$

若要对PV并网前后节点电压变化进行定量分析,可采用修改后的电压变动值公式计算:

$$d = \frac{dU}{U'} \times 100\% \quad (16)$$

式中: U' 为PV并网前POC点电压值。

4 对负荷变动引起的电压波动的抑制

以POC点作为评估点,某时刻该点负荷发生变动,变化量 $\Delta P_{L+j}\Delta Q_L$ 。忽略电压波动的纵向分量,并以 U_N 近似替代 U ,则负荷电压变化量为:

$$\Delta U = \frac{\Delta PR_k + \Delta QX_k}{U} = \frac{\Delta PR_k + \Delta QX_k}{U_N} \quad (17)$$

相对电压变动值为:

$$d = \frac{\Delta PR_k + \Delta QX_k}{U_N^2} \times 100\% = \frac{\Delta P \cos\varphi + \Delta Q \sin\varphi}{S_d} \times 100\% \quad (18)$$

由式(18)可知,负荷变动引起的电压波动与负荷功率变化量和配电网在POC点的短路容量有关。PV并网稳定运行后,相对电压变动值为:

$$d_{\text{new}} = \frac{\Delta P \cos\varphi + \Delta Q \sin\varphi}{S_{k\text{new}}} \times 100\% \quad (19)$$

则PV并网前后POC点的电压波动值变化率为:

$$\Delta d = \frac{d - d_{\text{new}}}{d} \times 100\% = \frac{S_{d\text{new}} - S_d}{S_{d\text{new}}} \quad (20)$$

式(20)中, $S_{d\text{new}}$ 为PV并网后POC点的短路容量。对于放射状配电网,可采用简化计算方法^[8],即分别求取各电源在给定点的短路容量,经串并联运算求得该点总的短路容量。

$$S_{d\text{new}} = S_d + S_{\text{PV}} \quad (21)$$

式中, S_{PV} 为PV提供的短路容量。短路容量是系统网络强度的标志。短路容量大(对应于低阻抗),表明网络强,负荷、功补装置或电源投切不会引起电压幅值大的变化。由公式(21)知,PV接入后增加了配电网的短路容量,使系统各节点之间的电气联系更紧密,当配电网内出现故障或出现冲击性负荷投切等情况时,由此造成的母线电压闪变、跌落的程度与PV接入前相比将会减小。但实际上,单个PV的装机容量一般不超过6 MW,受并网逆变器内电力电子器件保护限制,所能提供的最大短路电流不超过其2倍额定输出电流,即当PV接入10 kV电网时,其能提供的最大短路电流不超过0.66 kA。而城市10 kV配电网一般按16 kA或20 kA短路电流水平设计,因此,PV引入对短路容量的影响很

小,即对配电网由负荷变动引起的电压变动的抑制效果不明显。

5 算例仿真

采用IEEE 33节点配电网测试系统,基于电力系统分析综合程序PSASP6.24建立仿真平台。IEEE 33节点测试系统如图4所示,总有功负荷3 715 kW,总无功负荷2 300 kvar,各节点负荷为三相对称恒功率负荷,网络参数详见参考文献[6]。在0节点接入系统理想电源,PV不考虑电压调整,以恒功率电源并网。

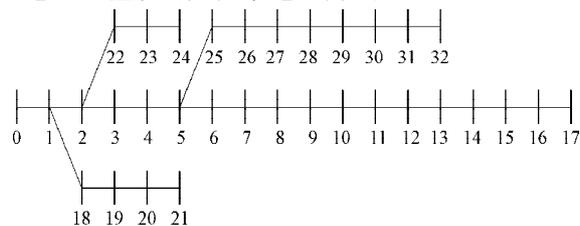


图4 IEEE 33节点测试系统

Fig. 4 IEEE 33 nodes system for testing

5.1 PV并网前后节点电压波动的仿真

在节点4接入1 000 kW PV电源,节点4及其以后所有节点的总负荷为2 115 kW。稳态电压分布如图5所示。在PV并网前,主馈线和各支路节点电压到线路末端均逐渐降低。PV并网稳态运行后,主馈线上各节点电压、各支路节点电压得到了不同程度的提升。由电压变化曲线可知,电压波动大小具有规律性,对于PV所在主馈线和POC点后的各支路的节点,节点电压波动较大,越靠近线路末端,电压波动越大,越靠近系统电源端,电压波动越小;而对于并网前主馈线的支路,电压波动相对较小。

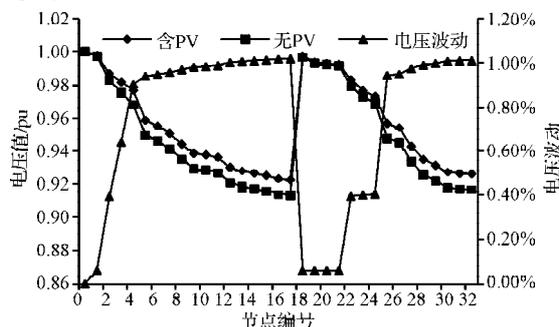


图5 PV并网对馈线电压的影响

Fig. 5 The feeder's voltage profile before and after interconnecting PV

5.2 PV输出功率变动对电压的影响

以节点7为POC点,该点所在主馈线上之后所有节点的负荷有功功率为875 kW。分别考虑输出功率500 kW、1 500 kW和4 000 kW 3种情况下,PV对POC点电压的影响。从图6的仿真结果可推出,PV输出功率越大,对各节点电压水平的支撑作用越强。对于PV所在主馈线各

节点,随着PV出力相对负荷水平比例的变化,POC点可转变为局部电压最高点,与2.2节的结论基本一致。考虑无功损耗,当PV出力超过所在配电区域内的负荷总有功功率时,可使POC点及其附近节点电压水平越限,不满足供电质量要求。

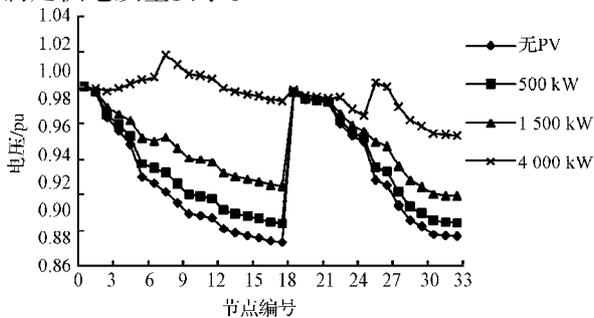


图6 PV输出功率变动对电压的影响

Fig. 6 Voltage profiles according to the variation of PV output power

为了使PV输出功率变化引起的配电网电压变化处于可控范围内,需对PV的容量进行限制。此外,一般接入配电网的中小型PV的启停不受电力调度部门的控制,如果单点PV容量过大,PV的启停会对周围用户的用电造成较大影响。美国德州分布式电源并网规定中明确指出:分布式电源容量不能超过最大负荷的25%^[2]。我国国家电网公司企标Q/GDW 617-2011《光伏电站接入电网技术规定》也指出:通过380 V电压等级并网的小型光伏电站总容量原则上不宜超过上一级变压器供电区域内最大负荷的25%。

5.3 PV接入位置对电压的影响

额定容量1 000 kW的PV分别接入主馈线上节点1、4、7、12、17,电压分布如图7所示。可以看出,PV接入不同位置对电压的影响不同,PV越靠近馈线末端,对电压的提升作用越大;为避免馈线末端电压水平越限,PV不宜在馈线末端接入系统,可在馈线中间偏末端的位置接入,以充分利用PV对节点电压的提升作用。

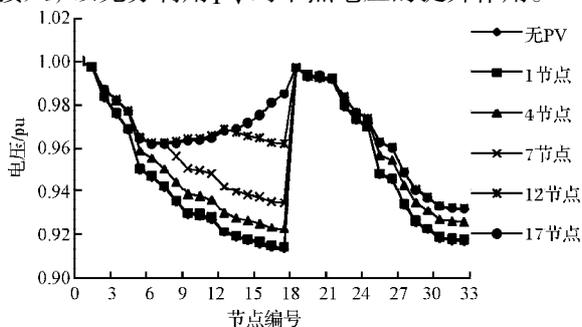


图7 PV接入位置不同引起的电压变化

Fig. 7 Voltage profiles according to the variation of PV interconnecting location

与本算例仿真有区别的是,实际配电系统中的负荷不只有恒功率负荷,还有一定的动态负荷和无功功率补

偿装置,如电动机负荷、补偿电容器等,这些负荷和装置的无功功率需求随电压变化而动态变化,PV的并网和退出对电网的影响会更复杂。PV并网后,电网电压被抬高,同时,动态负荷无功需求减少,电容补偿装置无功出力增大,从而可能需切除部分补偿装置;同样,PV退出后,电网电压下跌,动态负荷无功需求增加,而电容补偿装置无功出力却减少,可能增加电压跌幅^[9]。

6 结语

本文基于放射式配电网络、恒功率静态负荷模型,通过理论分析及仿真验证,说明了分布式光伏发电并入中低压配电网后,对配电网稳态电压分布和电压波动的影响原理及其大小判定,得出以下结论:

(1)分布式光伏发电接入中低压配电网后,将对馈线上的电压分布产生影响,影响程度与光伏电源的接入位置、装机容量有紧密的关系;

(2)分布式光伏发电并网运行中,若其输出功率瞬间发生较大变化,将引起馈线上各节点电压发生波动,波动大小与光伏电源装机容量及该点的电网强度有关;

(3)正常运行情况下,分布式光伏发电应保持高功率因数运行,尽量不发无功;

(4)分布式光伏发电宜在馈线中部靠后位置并网,而不宜在馈线末端并网;

(5)分布式光伏发电并网后,对配电网的短路容量影响很小。

参考文献:

- [1] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 53-56.
- [2] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.
- [3] IEEE 1547. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems[S]. 2003.
- [4] Dugan R C, Mcdermott T E. Distributed Generation[J]. IEEE Industry Application Magazine, 2002, 8(2): 19-25.
- [5] Scott N C, Atkinson D J, Morrell J E. Use of Load Control to Regulate Voltage on Distribution Networks with Embedded Generation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(2): 510-515.
- [6] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [7] 裴玮,盛鹏,孔力,等. 分布式电源对配电网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
- [8] Yuen M H. Short circuit ABC[M]. San Francisco: Gas Industries Association, 1975.
- [9] 朱守真,张昊,郑竞宏,等. 分布式电源与配电系统并网运行探讨[J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2005, 1(4): 1-4.

