

Scale Photovoltaic Connected to District Power Network Voltage Stability*

Feng Li¹, Shuang Zhang¹, Xuehong Yang¹, Bei Tian¹, Chunpeng Zhang², Chengfu Wang²

¹Ningxia Electric Power Company Electric Power Research Institute State Grid, Yinchuan

²Tsinghua University, Beijing

Email: wcf19841208@163.com

Received: Jul. 5th, 2013; revised: Jul. 24th, 2013; accepted: Jul. 30th, 2013

Copyright © 2013 Feng Li et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Large-scale photovoltaic hair to control access to the traditional power grid operation has brought a significant impact, including photovoltaic generation on voltage stability. This article will focus on large-scale photovoltaic power generation access for regional power grid voltage stability in-depth study to explore large-scale photovoltaic access to the regional power grid voltage stability related effects existing. This article first makes a deep analysis on solar farm operation and output characteristics, and constructs different scenes, under which makes a comparative analysis on the PV grid voltage stability. Based on the above analysis of impact, this article further studies the photovoltaic grid-connected inverter electric field and the field side reactive power compensation device to enhance the region's contribution to the stability of the grid voltage. Finally, in no additional reactive power regulation unit case, the realization of large-scale photovoltaic regional power grid voltage stability raised, which has an important reference value for large-scale photovoltaic grid connected areas.

Keywords: Photovoltaic Generation; Voltage Stability; Power Output Characteristic; Inverters

规模化光伏接入对地区电网电压稳定性的影响*

李峰¹, 张爽¹, 杨雪红¹, 田蓓¹, 张春朋², 王成福²

¹国网宁夏电力公司电力科学研究院, 银川

²清华大学, 北京

Email: wcf19841208@163.com

收稿日期: 2013年7月5日; 修回日期: 2013年7月24日; 录用日期: 2013年7月30日

摘要: 光伏发电的大规模接入对传统电网的控制运行带来了重大影响, 包括其对接入地区电网的电压稳定性。本文将针对大规模光伏发电对接入地区电网电压稳定性的影响进行深入研究。文章首先对光伏电场的运行与出力特性进行了深入分析, 进而构建了不同的光伏发电场景, 并对对比分析了不同场景下光伏发电对接入电网电压稳定性的影响。以上述影响分析为基础, 文章进一步研究了光伏电场的并网逆变器及场侧无功补偿装置对提升地区电网电压稳定性的贡献。最终在不增加额外无功调节装置的情况下, 实现了大规模光伏接入地区电网电压稳定性的提升, 对含大规模光伏接入的地区电网具有重要的借鉴、参考意义。

关键词: 光伏发电; 电压稳定性; 出力特性; 逆变器

*基金项目: 国家 863 计划(项目编号 2012AA050401)、中国博士后科学基金(2012M520270)资助。

1. 引言

受益于清洁可再生性，光伏发电在近年得到了长足发展，国内外的光伏发电装机容量均呈现持续、调整增长态势。但由于光伏发电的随机性与不可控性，其在为电网输送清洁能源的同时，亦对电网的运行调控带来了诸多问题，包括有功调度、无功控制及电压稳定等，且随其容量的不断增加，影响也愈加严重。为此，极有必要针对光伏接入带来的相关问题进行深入研究，以适应更大规模光伏发电的并网^[1,2]。

由于光伏发电运行的可控性不及传统机组，调控方式复杂多变，且具有强烈的随机波动性，必然对其接入的区域电网电压稳定性带来一定影响，例如东北电网吉林风电即因为电压问题引起连锁脱网故障，继而引起地区电网的大面积停电故障。由此，在光伏发电、风力发电介入越来越多的现代电力系统中，有可能因大量可再生能源发电而引起的电压稳定问题已经成为影响电力系统正常运行的一个重要威胁，其带来的电压稳定问题已经到了不得不重视的程度^[3-5]。

文章^[6]对光伏电站的无功电压特性进行了详细分析，提出了一种基于无功分层的光伏发电无功电压控制模式；文章^[7]对独立运行光伏系统的电压稳定性进行了研究分析，并证明无功功率不平衡是导致光伏系统电压不稳定的主要原因，并给出部分解决方法，但研究只针对独立运行的光伏系统；文章^[8-10]对光伏发电并网系统对配电网的电压稳定性影响进行了分析研究，确定认为负载功率波动、功率因数及所接配网的电压等级对其影响大，提高并稳定并网点功率因数是提高电压稳定性的根本方法。

综上，目前针对光伏发电的研究主要集中于光伏发电机组本体、独立运行光伏系统的特性研究及小规模、配电网接入光伏系统后的电压稳定性研究。关于规模化光伏接入对地区电网电压稳定性的影响尚未有相关的专门性文章对其进行研究。

本文将重点针对大规模接入光伏发电对地区电网电压稳定性进行深入研究，以探究大规模光伏接入对地区电网的电压稳定存在的相关影响。文章首先对光伏电场的运行与出力特性进行了深入分析，进而构建了不同的光伏发电场景，并对比分析了不同场景下光伏接入对地区电网电压稳定性的影响。以上述影响分析为基础，文章进一步研究了光伏电场的并网

逆变器及场侧无功补偿装置对提升地区电网电压稳定性的贡献。最终在不增加额外无功调节装置的情况下，实现了大规模光伏接入地区电网电压稳定性的提升，对具有大规模光伏接入的地区电网具有重要的借鉴、参考意义。

2. 光伏发电建模与特性分析

2.1. 光伏电站建模

基于电力电子变换器并网的三相光伏并网发电系统主要由光伏阵列、逆变桥和交流电路 3 部分组成，系统组成结构如图 1 所示。图中， U_{PV} 和 I_{PV} 为光伏阵列输出电压和电流； U_{ix} 和 I_{ix} 为逆变桥输出交流电压相量和电流相量，下标 A、B、C 分别表示 A、B、C 三相； U_{gx} 和 I_{gx} 为并网点电压相量和电流相量；M 和 A 分别为逆变桥幅值调制比和移相角。交流电路包括滤波器和升压变压器， L_f 和 C_f 是滤波电感和电容， R_T 、 X_T 、 G_T 和 B_T 分别是升压变压器#形等值电路的电阻、电抗、电导和电纳。

光伏阵列模型表示为 5 参数模型：

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{PV} = N_{PP} \left\{ I_L - I_o \left[\exp \left(\frac{U_{PV} + I_{PV} R_s}{N_s N_{ss} N_{PP}} \right) - 1 \right] \right. \\ \left. - \frac{U_{PV} + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \right\}, \\ P_{PV} = U_{PV} I_{PV}. \end{array} \right. \quad (1)$$

上式中： U_{PV} 、 I_{PV} 和 P_{PV} 分别为光伏阵列输出电压、电流和功率； N_s 是单个光伏组件中光伏电池的串联数； N_{ss} 为光伏组件的串联数； N_{pp} 为光伏组件串的并联数。该模型还有 5 个参数，分别为光电流 I_L 、二极管反向饱和电流 I_o 、理想因子 a 、串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 。通常，光伏组件厂商给出了标准额定条件 (SRC) 下的运行参数，SRC 特指太阳辐照度 1 kW/m^2 ，电池表面温度 25°C ，相对大气光学质量 AM 1.5 的条件。由出厂参数可得 5 个参数的 SRC 参考值，任意条

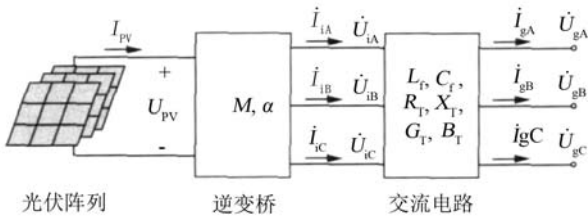


Figure 1. Photovoltaic system structure
图 1. 光伏并网系统结构图

件下的模型参数可在参考值基础上获得。

如果并网控制逆变器使用了最大功率跟踪(MPPT)控制策略,则光伏阵列可运行在最大功率点(MPP),MPP点的光伏阵列电压和电流应满足以下非线性方程:

$$\frac{I_{PV}}{N_{PP}} + \frac{U_{PV}}{N_s N_{ss}} - I_o R_{sh} \exp\left(\frac{U_{PV} + I_{PV} R_s}{N_s N_{ss}} + \frac{I_{PV} R_s}{N_{PP}}\right) - a = 0 \quad (2)$$

$$a R_{sh} + I_o R_s \exp\left(\frac{U_{PV} + I_{PV} R_s}{N_s N_{ss}} + \frac{I_{PV} R_s}{N_{PP}}\right) + a R_s$$

其次,逆变器采用π型等值电路模型。逆变器包括逆变桥和交流电路两部分。为了便于计算,交流电路进行了等值变换,图2为变换后的单相π型等值电路。

假定图1中逆变桥为理想三相半桥式逆变电路且采用正弦波脉宽调制(SPWM),并忽略逆变损耗和谐波分量,那么由瞬时功率平衡关系和SPWM原理可得出:

$$P_i = P_{PV} = \frac{3}{4} M U_{PV} \angle \alpha \quad (3)$$

式中: P_i 为逆变桥输出的三相交流有功功率,稳态情况下等于光伏阵列的输出功率 P_{PV} 。

光伏发电系统运行参数应满足如下约束条件。

容量约束:系统输出视在功率应不大于额定功率SN,也可转化为对无功功率的约束条件。

电压约束:直流母线电压和交流并网点电压在正常运行允许范围以内。

调制比 M : 取决于逆变器调制方式,传统SPWM方式的 M 取值范围为0~1,某些特殊调制方式的 M 可大于1。

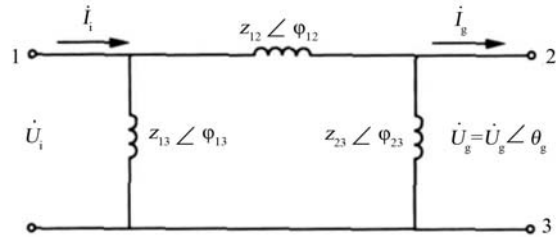


Figure 2. Equivalent circuit diagram of an inverter
图 2. 逆变器等值电路图

2.2. 光伏出力特性分析

本文以我国西部某区域电网为研究对象,该区域电网内存在大量的风电、光伏等可再生性间歇能源接入,具有非常典型的研究意义。

该地区电网的统调装机容量为3300MW、光伏接入容量为210MW、风电接入容量为890MW,后续计算分析中。图3为该区域电网内光伏电站的典型日出力曲线,图4则为3个月统计周期内的光伏出力包络线。

光伏电站对电网电压稳定性的贡献能力取决于电站自身的无功调节能力,而光伏电站的无功输出能力受制于无功补偿装置与逆变器两部分,其中无功补偿相对稳定,光逆变器的无功调节则由其容量与当前输出有功功率大小决定。光伏逆变器的功率方程如式所示。

$$P^2 + \left(Q + \frac{U_o^2}{x_i}\right)^2 = \left(\frac{U_i U_o}{x_i}\right)^2 \quad (4)$$

式中: U_i 是逆变器交流侧电压值; U_o 是接入并网点的电压值大小; x_i 是逆变器的等值阻抗; P 、 Q 则分别是逆变器调节输出的有功和无功功率值。

根据前文分析所得地区电网内光伏出力特性(如图3所示),结合式(4),并同时考虑该地区电网光伏电站所配备的约20%的无功补偿,可得在典型出力下,光伏电站的无功调节范围如图5所示。

3. 光伏发电场景划分

为分析不同状态下光伏发电对地区电网电压稳定性的影响,本文构建四种光伏出力场景,如表1所示。

表1中,场景1为无光伏出力情况,即原有区域电网的运行情况,用以对比;场景2为光伏出力较小,

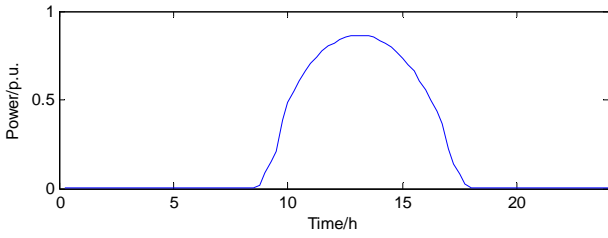


Figure 3. Typical output characteristic curve of photovoltaic power plants
图 3. 区域电网内典型光伏电站出力特性

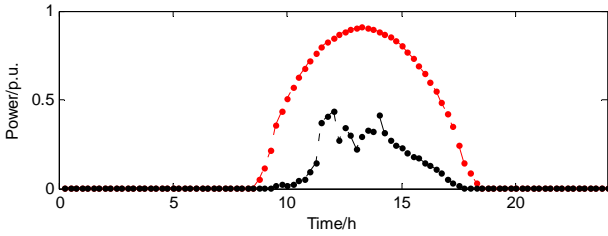


Figure 4. Regional power grid PV output envelope
图 4. 区域电网内光伏出力包络线

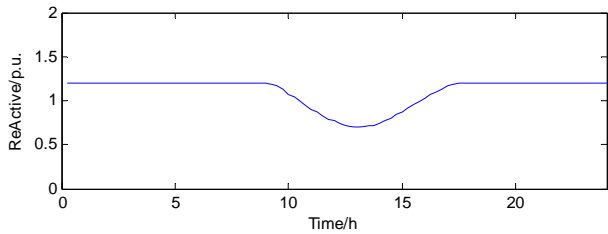


Figure 5. Typical output reactive power regulation under the scope
图 5. 典型出力下的无功调节范围

Table 1. PV output scene classification
表 1. 光伏出力场景分类

场景	光伏出力占比	无功利用
场景 1	无光伏出力	无
场景 2	15%	有
场景 3	85%	有

其光伏出力约占装机容量 15%左右, 该场景可用以描述早晚时的调节状况; 场景 3 为光伏出力较大时的状态, 此时光伏出力约占其装机容量的 85%左右。在 3 种场景中, 后两种由于接入了光伏电站, 因此需要同时考虑电站所配备的无功补偿设备之调节能力。

4 系统模型及裕度指标

4.1. 电压稳定分析系统模型

无论电网如何复杂, 在某一潮流断面下, 电网除发电节点(或 PV 节点)之外的任意节点, 都可等效为

如图 1 所示的简单 2 节点系统。因为完全基于系统实测响应数据, 所以在当前断面下, 戴维南等效参数的辨识结果蕴含了复杂网络并行流的影响。

图 6 中, (a)图为节点 n 的局部网络图, 节点 n 的功率流入线路(按有功流入定义) $L_{ni} (i=1, 2, \dots, M)$ 用 π 型等值模型表示, 如图 6 中(a)图左半部分所示。右半部分虚线框代表节点 n 的流出功率 $P_{on} + jQ_{on}$, 包括从节点 n 流出的线路功率、节点 n 上的负荷、发电机功率及无功补偿。图 6 中(b)图为节点 n 的局部网络等值模型, $P_n + jQ_n$ 等于 $P_{on} + jQ_{on}$ 减去该节点功率流入线路 π 型模型的受端电容充电功率, 在本项目中将 $P_n + jQ_n$ 称为节点 n 的等效负荷。该等效负荷可代表实际系统中遇到的所有情况。 $Z_{eq} \angle a = R + jX$ 为等效阻抗, $E_{eq} \angle \delta_{eq}$ 等效电源电势, 二者统称等效参数, $U_n \angle \delta_n$ 为节点实际电压。可见, 该模型不同于节点对地意义上的戴维南等值, 有局部显现简单 2 节点系统输电物理规律的功效, 具有普适性。

4.2. 电压稳定分析裕度指标

1) 阻抗模指标

对于图 6(b)所示的系统, 当等效负荷阻抗模和等效支路阻抗模相等时, 达到电压稳定临界点(最大传输功率)。令 Z_{ld} 表示等效负荷主抗模, 则用阻抗模表示的静态电压稳定裕度指标为:

$$V_{zsi} = \frac{Z_{ld} - Z_{eq}}{Z_{ld}} \quad (5)$$

当 V_{zsi} 为 0 时, 达到电压稳定临界点, V_{zsi} 越小表示静态稳定裕度越低。

2) 最大有功功率表示的指标

就负荷侧的性质看, 当计及负荷功率因数时, 电压稳定的临界条件为

$$P_{ncr} = \frac{E_{eq}^2 \cos \Phi_n}{2Z_{eq} [1 + \cos(\alpha - \Phi_n)]} \quad (6)$$

$$Q_{ncr} = P_{ncr} \cdot \tan \Phi_n \quad (7)$$

$$U_{ncr} = \frac{E_{eq}}{\sqrt{2[1 + \cos(\alpha - \Phi_n)]}} \quad (8)$$

式中 U_{ncr} 、 P_{ncr} 、 Q_{ncr} 分别为临界点处的电压、系统最大传输有功功率和无功功率。

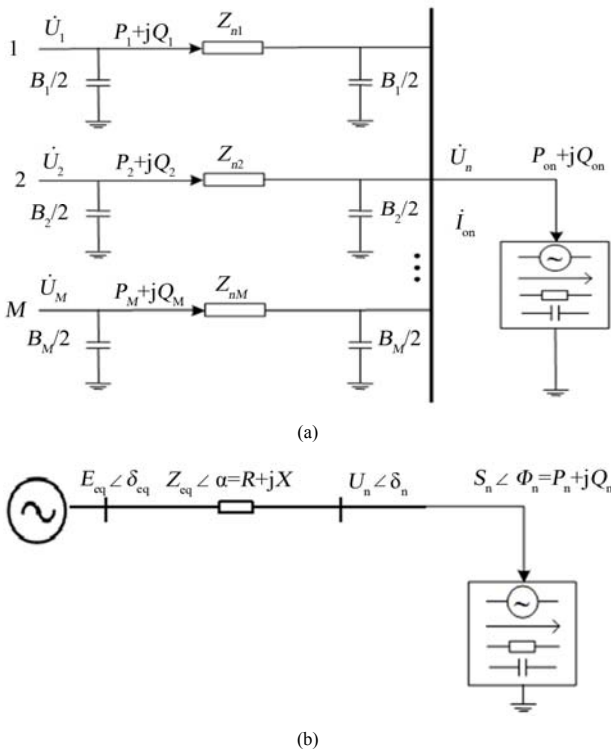


Figure 6. Thevenin equivalent two-node system; (a) Original local network model; (b) Equivalent local network model
图 6. 戴维南等效 2 节点系统; (a) 原局部网络模型; (b) 等效局部网络模型

则用阻抗模表示的静态电压稳定裕度指标为:

$$V_{psi} = \frac{P_{ncr} - P_n}{P_{ncr}} \quad (9)$$

当 V_{psi} 为 0 时, 达到电压稳定临界点, V_{psi} 越小表示静态稳定裕度越低。

3) 角度表示的指标

在静态电压稳定临界点处, 图 6(b) 所示简单两节点系统两端电压相角差满足以下条件:

$$\delta_{ncr} = \begin{cases} -0.5\Phi_n + 0.5\alpha, & -\alpha \leq \Phi_n \leq \pi/2 \\ 0.5\Phi_n + 1.5\alpha, & -\pi/2 \leq \Phi_n \leq -\alpha \end{cases} \quad (10)$$

用角度表示的静态电压稳定裕度指标为:

$$V_{\delta si} = \frac{\delta_{ncr} - \delta}{\delta_{ncr}} \quad (11)$$

式中 δ 为等效系统两端电压相角差为

$$\delta = \delta_{eq} - \delta_n \quad (12)$$

当 $V_{\delta si}$ 为 0 时, 达到电压稳定临界点, $V_{\delta si}$ 越小表示静态稳定裕度越低。

5. 仿真分析

利用前文所述方法进行仿真计算, 求得电压、功率裕度, 以反应静态电压稳定性, 在本文仿真计算中所述参数均为标么值, 功率基准为 100 MW。仿真分析中的负荷增长方式包括: 方式 1(优先增长本地出力); 方式 2(优先增长区域内主供机组); 方式 3(优先增长区域外联络线功率)。

5.1. 场景 1 下的电压稳定分析

图 7 为场景 1 中, 方式 1 状态下的地区负荷节点电压幅值变化曲线, 其中母变 G 的电压跌落最低。

三种功率增长方式下, 地区负荷水平参数 λ 以及负荷有功临界值如表 2 所示。

从上表可以看出, 地区电网在三种功率增长方式下所得功率裕度比较相近, 说明三种供电方式下, 各电源对该地区无功电压支撑能力较为接近。在负荷同比增长情况下, 地区各负荷节点的电压呈现不同情况的跌落。综合各方式下的 PV 曲线走势, 以母变 G 站以及母变 D 站电压跌落最为严重, 是该地区电压稳定薄弱节点。

5.2. 场景 2 下的电压稳定分析

图 8 为场景 1 中, 方式 1 状态下的地区负荷节点电压幅值变化曲线, 其中仍为母变 G 的电压跌落最低。

三种功率增长方式下, 地区负荷水平参数 λ 以及负荷有功临界值如下表所示:

由表 3 可看出, 在场景 2 下, 地区电网三种功率增长方式所得功率裕度大小顺序与场景 1 的顺序相同, 从功率裕度数值上看, 与场景 1 走势相似, 其地区电压稳定薄弱节仍为母变 G 站以及母变 D 站, 但场景 1 的电压稳定裕度要明显好于场景 2, 这说明母变 B、C、D 等光伏电站的接入有利于地区电压稳定性, 尤其在电压稳定薄弱场站 D 站的接入对提高本区域电网电压稳定性起到了非常积极的作用。

5.3. 场景 3 下的电压稳定分析

图 9 为场景 1 中, 方式 1 状态下的地区负荷节点电压幅值变化曲线, 其中仍为母变 G 的电压跌落最低, 跌落幅度相关不大。

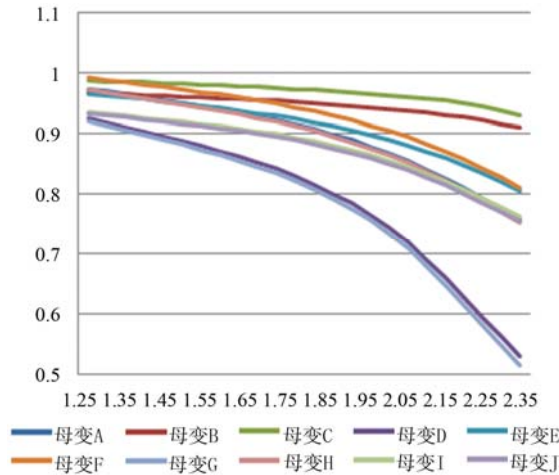


Figure 7. Scene 1 of the areas under the load node voltage amplitude variation curves
图 7. 场景 1 下地区负荷节点电压幅值变化曲线图

Table 2. Scene 1 of the areas under the load level increased contrast
表 2. 场景 1 下地区负荷水平增长对比

λ_{cr} (方式 1)	λ_{cr} (方式 2)	λ_{cr} (方式 3)	$\Delta\bar{\lambda}$ (均值)
2.4	2.35	2.35	1.37
P_{cr} (方式 1)	P_{cr} (方式 2)	P_{cr} (方式 3)	$\Delta\bar{P}$ (均值)
36.79	36.02	36.02	20.95

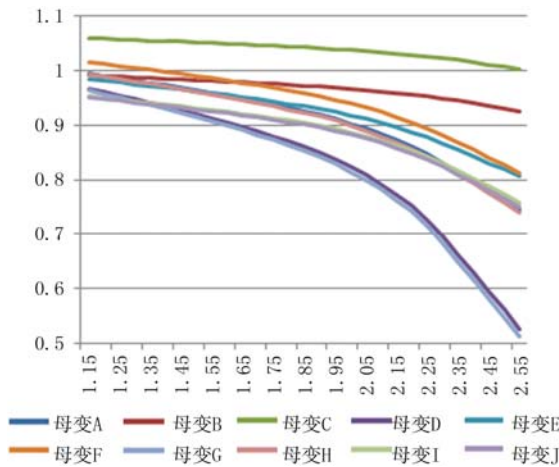


Figure 8. Scene 2 of the areas under the load node voltage amplitude variation curves
图 8. 场景 2 下地区负荷节点电压幅值变化曲线图

Table 3. Scene 2 of the areas under the load level increased contrast
表 3 场景 2 下地区负荷水平增长对比

λ_{cr} (方式 1)	λ_{cr} (方式 2)	λ_{cr} (方式 3)	$\Delta\bar{\lambda}$ (均值)
2.55	2.5	2.45	1.5
P_{cr} (方式 1)	P_{cr} (方式 2)	P_{cr} (方式 3)	$\Delta\bar{P}$ (均值)
39.09	38.32	37.55	22.99

三种功率增长方式下，地区负荷水平参数 λ 以及负荷有功临界值如表 4 所示。

由表 4 可看出，在场景 3 下，仍采用与场景 1、2 相同的功率增长方式顺序，在功率裕值上，场景 3 的电压稳定裕度要略好于场景 1，但不如场景 2 大，这说明母变 B、C、D 等光伏电站的接入有利于地区电压稳定性，但由于光伏大发情况下，其可控的无功调节能力有限，导致裕度不如场景 2。

通过上述三种场景下的地区电网电压稳定裕度分析可知，由于光伏电站本身具有一定的无功调节能力，光伏电站接入总体上有益于接入地区电网的电压稳定性。光伏出力水平较高时虽能为电网提供较多的有功功率，但其无功调节能力受到影响，因此在光伏出力水平较低时，其对电网的电压稳定性贡献较大。

6. 结论

本文提出充分利用光伏电场已有无功补偿装置及逆变器侧无功调节能力的方式方法，在不增加额外装置前提下，实现规模化光伏接入地区电网电压稳定性的进一步提升。构建了不同的光伏发电场景与光伏

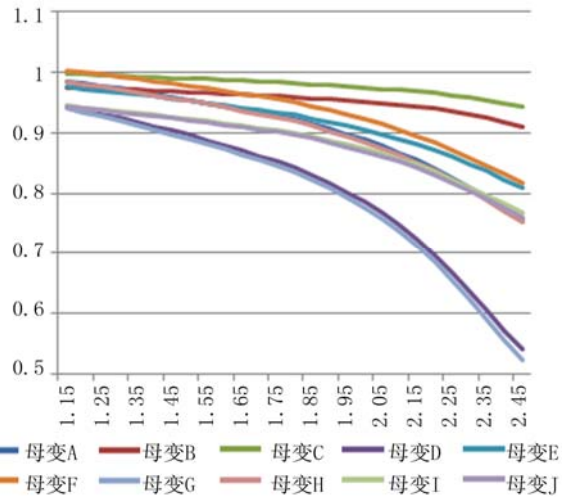


Figure 9. Scene 3 of the areas under the load node voltage amplitude variation curves
图 9. 场景 3 下地区负荷节点电压幅值变化曲线图

Table 4. Scene 3 of the areas under the load level increased contrast
表 4. 场景 3 下地区负荷水平增长对比

λ_{cr} (方式 1)	λ_{cr} (方式 2)	λ_{cr} (方式 3)	$\Delta\bar{\lambda}$ (均值)
2.45	2.4	2.4	1.37
P_{cr} (方式 1)	P_{cr} (方式 2)	P_{cr} (方式 3)	$\Delta\bar{P}$ (均值)
37.56	36.79	36.79	21.72

电站模型，并确定了电压稳定性分析方法，最终通过所建模型的仿真分析，证明了本文所提方法的有效性与可行性。

参考文献 (References)

- [1] 袁铁江, 张俊, 晁勤等等. 大规模风电接入电力系统的静态电压稳定特性研究[J]. 低压电器, 2011, 8(11): 33-37.
- [2] 金海峰, 吴涛. 风电接入系统后的电压稳定问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 82-85.
- [3] 宋伟伟, 李强, 袁越. 双馈式风电机组接入地区电网后的电压稳定分析[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(5): 36-41.
- [4] 袁铁江, 晁勤, 李义岩, 吐尔逊伊不拉音. 大规模风电并网电力系统经济调度中风电场出力的短期预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 23-27.
- [5] 周玮, 彭昱, 孙辉等. 一种用于含风电场电力系统电压稳定概率分析的混合方法[J]. 继电器, 2008, 36(2): 26-32.
- [6] 盛昆, 孔力, 苗蕾, 裴伟. 独立运行光伏系统暂态电压稳定分析[J]. 继电器, 2006, 34(23): 34-39.
- [7] 施佳锋, 沈燕, 耿多, 马军, 丁茂生, 马冬冬. 含光伏发电的电网无功电压协调控制[J]. 宁夏电力, 2012, 33(5): 1-5.
- [8] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 王伟胜. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-145.
- [9] 陈权, 李令冬, 王群, 段晓波. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
- [10] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 张建华. 考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 20-24.