

# 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析

李题印<sup>1</sup>, 韩永强<sup>1</sup>, 胡晓琴<sup>1</sup>, 潘 姝<sup>2</sup>, 周念成<sup>2</sup>

(1. 国网浙江杭州市余杭区供电公司, 浙江 杭州 311100;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 分布式发电(Distributed Generation, DG)接入电网在缓解环境污染和能源短缺压力的同时, 也会给电网的安全运行分析带来新的挑战, 特别是DG控制策略的多样性将使电网静态电压稳定问题更加复杂。DG接入电网对静态电压稳定性的影响主要取决于DG的接入容量、控制方式等因素。首先对DG接入线路的复杂外部网络进行等值, 推导负荷节点电压与分布式发电渗透率的解析表达式。在此基础上, 分析不同DG渗透率下的节点电压以及负荷PV特性, 比较DG采用不同无功控制策略对负荷PV特性的影响。最后, 将扩展线路电压稳定指标应用于含DG的电网静态电压稳定分析, 研究DG采用主动无功控制策略对线路电压稳定指标的影响。

**关键词:** 分布式发电; 渗透率; 静态电压稳定; 无功控制; 负荷特性

## Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis

LI Ti-yin<sup>1</sup>, HAN Yong-qiang<sup>1</sup>, HU Xiao-qin<sup>1</sup>, PAN Shu<sup>2</sup>, ZHOU Nian-cheng<sup>2</sup>

(1. Yuhang Power Supply Bureau of Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 311100, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The integration of distributed generation relieves the pressure of environmental pollution and energy shortage, but at the same time it could bring new challenge to the grid safe operating analysis, particularly the variation of DG control strategies may complicate the static voltage stability analysis. The effect of integrating DG on static voltage stability mostly depends on the capacity and control strategies of DG. Firstly, the equivalent circuit of external grid of DG integrating line is implemented and the analytic expression of load voltage regard to the penetration of DG is derived, and on the basis, the load voltage and the PV characteristic is analyzed under different DG penetrations. Then the impact of the different reactive power control strategies on load PV characteristic is compared. At last, the extended line voltage stability index is used to study the effects of DG reactive power control strategies on the line voltage stability index.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277184).

**Key words:** distributed generation; power penetration level; static voltage stability; reactive control; load characteristic

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)12-0008-06

## 0 引言

随着环境污染加剧和能源日益短缺, 分布式发电(Distributed Generation, DG)以环保、高效和灵活等特点得到各国的高度重视和大力发展<sup>[1-2]</sup>。并网DG穿透功率的增加将改变电网能源结构, 对电网

电压、电能质量和运行规划等方面产生影响<sup>[3-6]</sup>, 其中电压稳定问题是一个重要方面。

接入电网DG规模的扩大将替代更多的传统电源, 进而改变线路的有功、无功大小和方向, 影响系统中各节点的稳态电压分布<sup>[7-8]</sup>。当DG的扰动引起负荷电压不能维持在允许范围内时, 电网可能出现电压失稳。DG接入电网的静态电压稳定性主要取决于DG接入容量(即穿透功率)、类型(含不同控制方式)和接入位置等因素<sup>[9-12]</sup>。文献[9-10]研究了不同类型的DG在接入位置和穿透功率变化时对电网

**基金项目:** 国家自然科学基金(51277184); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711209)

静态电压稳定性的影响,文献[11]对DG接入电网的静态电网稳定裕度进行概率评估。随着DG穿透功率不断增加,其对电网静态电压稳定的影响将愈加显著<sup>[4]</sup>,但是前述文献仅对比分析不同穿透率下电网静态电压稳定特性,没有解释静态电压稳定性与DG穿透功率的关系。实际运行中DG具有一定的无功调节能力,其主动参与配电网控制更有利于系统功率平衡和电压稳定性<sup>[3,12]</sup>。DG采用的主动电压控制策略不同,对电网电压稳定的影响也不尽相同,但是现有文献尚未分析其主动控制对电压稳定性的影响。

本文针对静态电压稳定性与DG穿透功率的关系,将DG接入线路的外网进行戴维南等值得到含DG电网的两节点简化模型,进而推导电网负荷节点电压与DG渗透率的解析表达。分析不同渗透率下含DG电网的静态电压特性,并讨论DG采用不同无功控制策略对静态电压特性的影响。此外,将文献[13]的扩展线路电压稳定指标(Extended Line Stability Index, ELSI)推广至DG所接入线路的电压稳定量化分析,比较不同无功控制策略对电压稳定指标的影响。

## 1 含分布式发电电网等值模型及负荷节点电压计算

### 1.1 含分布式发电电网负荷节点电压计算

含DG电网的静态电压稳定性与线路、电网参数、DG输出功率等因素相关。考虑到外部电网结构的复杂性,需对外部网络进行等值。图1(a)中DG和负荷经线路接入电网,节点*i*电压为 $\dot{U}_i$ ,注入节点*k*功率为 $S_{ki}$ ;DG注入电网功率为 $P_{DG}+jQ_{DG}$ ,负荷功率为 $P_l+jQ_l$ , $Z_{kl}$ 为线路阻抗。如图1(b)所示,在静态电压稳定分析时可将线路*kl*以外的局部网络进行戴维南等值<sup>[14]</sup>,图中 $E_k\angle\theta_k$ 和 $R_k+jX_k$ 为等值电源和等效阻抗。

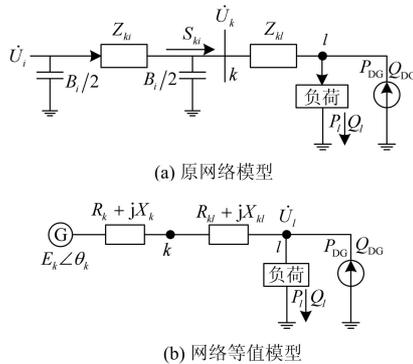


图1 分布式发电接入电网的外网等值

Fig. 1 Equivalence of the branch integrating DG

图2为含DG电网等效电路, $P_g$ 和 $Q_g$ 为常规电源的有功无功功率; $Z_l=R_l+jX_l=(R_k+R_{kl})+j(X_k+X_{kl})$ 为外网等效阻抗和线路阻抗之和, $P_l$ 和 $Q_l$ 为网络损耗的有功和无功,负荷节点电压 $U_l\angle 0$ 设为参考电压。其中外网的戴维南等值可根据多时段的SCADA数据,利用最小二乘法得到戴维南模型参数<sup>[15]</sup>。常规电源所发出的复功率可表示为

$$S_g = (E_k\angle\theta)I^* = \frac{|E_k|(\cos\theta + j\sin\theta)[|E_k|(\cos\theta - j\sin\theta) - |U_l|]}{R_l - jX_l} \quad (1)$$

其有功和无功功率分别为

$$P_g = \text{Re}\{S_g\} = \frac{|E_k|}{R_l^2 + X_l^2} [R_l|E_k| + |U_l|(X_l\sin\theta - R_l\cos\theta)] \quad (2)$$

$$Q_g = \text{Im}\{S_g\} = \frac{|E_k|}{R_l^2 + X_l^2} [X_l|E_k| - |U_l|(R_l\sin\theta + X_l\cos\theta)] \quad (3)$$

外网阻抗和线路消耗的有功和无功功率为

$$P_l = \frac{|E_k|^2 R_l - 2|E_k||U_l|R_l\cos\theta + |U_l|^2 R_l}{R_l^2 + X_l^2} \quad (4)$$

$$Q_l = \frac{|E_k|^2 X_l - 2|E_k||U_l|X_l\cos\theta + |U_l|^2 X_l}{R_l^2 + X_l^2} \quad (5)$$

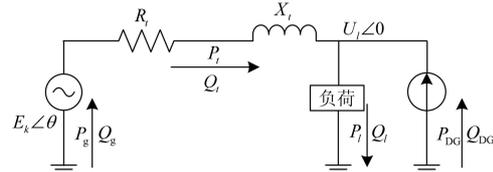


图2 分布式发电接入电网的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the grid integrating DG

正常运行时并网DG通常采用单位功率因数运行,这里先设DG只提供有功功率即 $Q_{DG}=0$ ,而负荷节点设为恒定功率因数即 $Q_l=k_1P_l$ 。由图2可得系统有功和无功功率的平衡式分别为

$$P_g + P_{DG} - P_l = P_l \quad (6)$$

$$Q_g = Q_l + Q_l \quad (7)$$

将式(2)、式(4)代入式(6)可得

$$|E_k||U_l|(-X_l\cos\theta - R_l\sin\theta) = (P_{DG} - P_l)(R_l^2 + X_l^2) - |U_l|^2 R_l \quad (8)$$

将式(3)、式(5)以及 $Q_l=k_1P_l$ 代入式(7)可得

$$|E_k||U_l|(X_l\cos\theta - R_l\sin\theta) = k_1P_l(R_l^2 + X_l^2) + |U_l|^2 X_l \quad (9)$$

式(8)、式(9)两端同时平方并相加消去常规电源电压的功角 $\theta$ ,进而得到 $U_l$ 是关于 $P_{DG}$ 的一个一元四次方程为

$$U_l^4 + [2k_1P_lX_l - 2(P_{DG} - P_l)R_l - E_k^2]U_l^2 + [(P_{DG} - P_l)^2 + k_1^2P_l^2](R_l^2 + X_l^2) = 0 \quad (10)$$

由上式即可得负荷节点电压幅值随DG输出功率的变化特性。而DG穿透功率可从多个角度来定

义, 如基于系统的可用容量、系统提供的总能量和系统的总负荷等<sup>[4]</sup>。采用接入电网 DG 装机容量与系统总负荷之比表征 DG 的穿透功率, 即 DG 渗透率  $\eta_p$ 。将式(10)中的  $P_{DG}$  用渗透率  $\eta_p$  和负荷有功功率  $P_l$  表示, 得负荷电压与渗透率的关系为

$$U_l^4 + \left[ 2k_l P_l X_l - 2(\eta_p \sqrt{P_l^2 + k_l^2 P_l^2} - P_l) R_l - E_k^2 \right] U_l^2 + \left[ (\eta_p \sqrt{P_l^2 + k_l^2 P_l^2} - P_l)^2 + k_l^2 P_l^2 \right] (R_l^2 + X_l^2) = 0 \quad (11)$$

求解上述方程得到负荷电压  $U_l$  关于渗透率  $\eta_p$  的解析表达式为

$$U_l = \pm \sqrt{\frac{E_k^2}{2} - A + R_l S_l \eta_p \pm \frac{1}{2} \sqrt{C}} \quad (12)$$

其中,

$$S_l = \sqrt{P_l^2 + Q_l^2} = \sqrt{P_l^2 (1 + k_l^2)}$$

$$A = R_l P_l + X_l Q_l = R_l P_l + X_l k_l P_l$$

$$B = X_l P_l - R_l Q_l = X_l P_l - R_l k_l P_l$$

$$C = E_k^4 - 4E_k^2 (A - R_l S_l \eta_p) - 4B^2 + 8B X_l S_l \eta_p - 4X_l^2 S_l^2 \eta_p^2$$

可以看出, 当网络参数不变时, 负荷电压与 DG 渗透率大致呈二次关系。而线路的电抗值远大于电阻值, 因此含  $\eta_p$  的各项中  $\sqrt{C}$  里的  $-4X_l^2 S_l^2 \eta_p^2$  为主导项, 故负荷电压与  $\eta_p$  呈开口向下的二次函数关系, 即负荷电压在  $\eta_p$  变化过程中将出现峰值。

## 1.2 分布式发电渗透率与负荷节点电压关系

由负荷电压解析式可得负荷节点电压幅值随  $\eta_p$  变化的特性, 其中负荷电压 4 个解中只有 1 个正实数解为有效解。已知某地区电网 10 kV 线路的外网等值电势  $E_k=1.032$  pu, 最小运行方式和最大运行方式下等效阻抗  $R_k$ 、 $X_k$  分别为 0.13 pu、0.01 pu 和 0.07、0.0015, 线路阻抗  $R_{kl}=0.02$  和  $X_{kl}=0.33$ , 负荷有功  $P_l=0.9$ , 负荷无功占有功比例系数  $k_l=0.1$ 。

最小和最大运行方式下  $\eta_p$  从 0 到 80% 变化时负荷电压特性曲线, 如图 3 所示。随着 DG 渗透率的增加, 负荷电压先增大再逐渐减小, 这与由负荷电

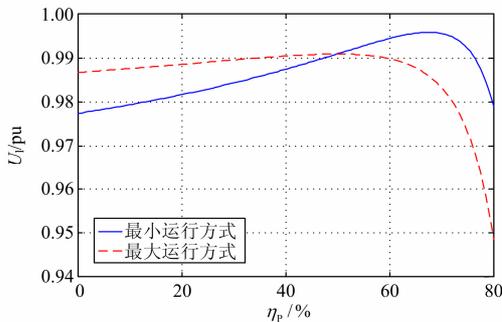


图 3 负荷电压随 DG 渗透率变化特性

Fig. 3 Variations of load voltage with the increase of DG penetration

压解析式得到的走势相符, 即在  $\eta_p$  增大过程中负荷电压存在峰值。两种运行方式下得到的外网等值阻抗的不同, 会影响负荷节点电压随  $\eta_p$  变化趋势。最小运行方式的电压峰值比最大运行方式时的峰值更大, 且峰值对应的  $\eta_p$  更大。

图 4 显示了系统的无功功率损耗  $Q_l$  (仅给出最小运行方式的情况) 随着 DG 渗透率的变化趋势。可以看出, 无功损耗随渗透率的变化基本与负荷电压趋势相反, 即随着渗透率增加, 系统无功损耗先逐渐减小, 再增大到比未接入 DG 时更大无功损耗值。由于负荷无功功率恒定, 常规电源发出的无功功率变化趋势与无功损耗基本一致。DG 渗透率超过一定值后, 无功增加的原因是 DG 输出功率增加引起线路无功损耗增大, 进而导致负荷电压减小。

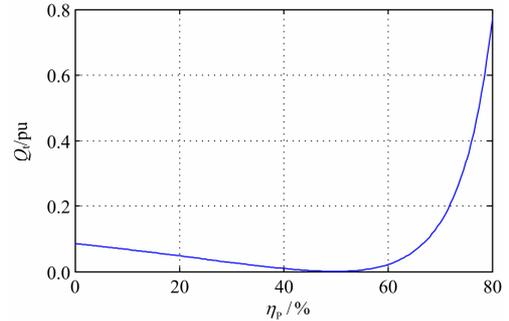


图 4 系统无功损耗随 DG 渗透率变化特性

Fig. 4 Variation of the system reactive power loss with the increase of the DG penetration

## 2 分布式发电渗透率和主动无功控制对静态电压稳定影响分析

### 2.1 分布式发电渗透率对静态电压稳定影响

由式(12)可得不同渗透率下的负荷节点 PV 特性, 其中节点电压和负荷有功功率为标么值。采用前述算例最小运行方式下的参数, DG 渗透率  $\eta_p$  分别取 0、30%、50%、60% 和 80% 时负荷 PV 曲线如图 5 所示。

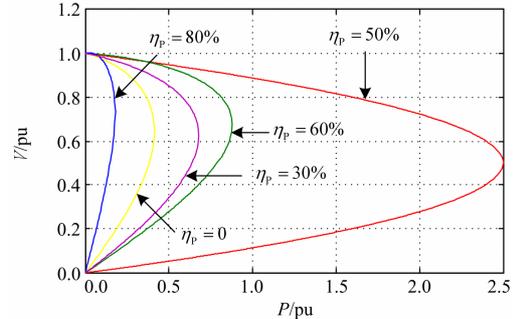


图 5 不同渗透率下负荷 PV 曲线

Fig. 5 PV curves under different penetrations of DG

当 DG 渗透率  $\eta_p < 50\%$  时, 随着渗透率的增大, PV 曲线负荷极限增大; 而当  $\eta_p > 50\%$  后, 渗透率增大时负荷极限反而逐渐减小。另外, 负荷极限对应的电压稳定临界点随 DG 渗透率的增大先降低再升高,  $\eta_p$  为 50% 时稳定运行的电压区间最大。

图 6 为负荷极限  $P_{cr}$  和对应的临界电压  $V_{cr}$  随 DG 渗透率  $\eta_p$  增加的变化情况。负荷极限随渗透率的增加增大至峰值再逐渐回落, 而临界电压变化趋势则相反。渗透率  $\eta_p$  为 50% 时负荷极限出现最大值, 而临界电压值为最低值, 此时系统能够承受最多的负荷, 可稳定运行的电压区间最大。这表明电网中接入 DG 低于该临界渗透率时, 将更有利于系统的静态电压稳定。

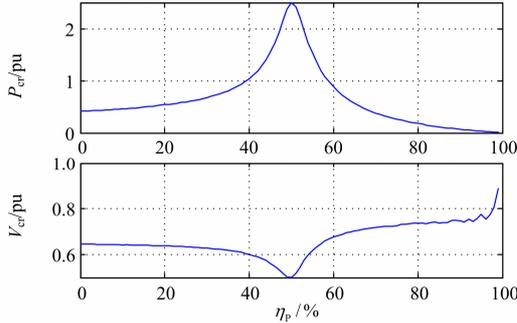


图 6 负荷极限和临界电压随 DG 渗透率变化曲线

Fig. 6 Variation of the load power limit and the critical voltage with the increase of DG penetration

## 2.2 主动无功控制对静态电压稳定影响

实际中 DG 具有一定的无功调节能力, 已逐渐被要求主动参与配电网主动无功控制。为此, 考虑 DG 提供的无功功率与有功功率成正比, 即  $Q_{DG} = k_2 P_{DG}$ 。当  $k_2$  为正时表示 DG 向系统提供无功功率, 而当  $k_2$  为负时表示 DG 从系统吸收无功。则无功功率平衡式(7)应改写为

$$Q_g + Q_{DG} = Q_T + Q_l \quad (13)$$

将式(3)和式(5)以及  $Q_l = k_1 P_l$  和  $Q_{DG} = k_2 P_{DG}$  代入上式可得

$$U_l^4 + [2(k_1 P_l - k_2 P_{DG}) X_l - 2(P_{DG} - P_l) R_l - E_k^2] U_l^2 + [(P_{DG} - P_l)^2 + (k_1 P_l - k_2 P_{DG})^2] (R_l^2 + X_l^2) = 0 \quad (14)$$

根据上式可得 DG 不同无功出力下的负荷节点 PV 特性, 图 7 为 DG 渗透率为 20%,  $k_2$  分别取 0.1、-0.1 和 0 而其他参数不变时的负荷 PV 特性曲线。可以看出, 当 DG 吸收无功功率时, 系统的临界电压对应的负荷极限比 DG 仅发出有功功率时的更小; 而 DG 发出无功功率时的负荷极限比仅发出有功功率时更大。这说明 DG 发出无功功率的情况更有利于系统的静态电压稳定, 但负荷节点的临界电压不

随 DG 无功的变化而变化。

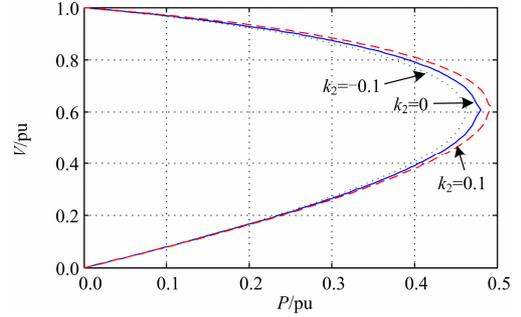


图 7 不同 DG 无功控制下负荷 PV 曲线

Fig. 7 PV curves under different reactive power of DG

图 8 为不同 DG 无功控制策略下负荷极限随渗透率增大的变化情况。这更加清晰地反映了 DG 无功功率对系统静态电压稳定的影响。与 DG 仅发出有功功率的情况相比, 当其吸收无功时, 不同渗透率下的负荷极限都有所减小, 且在  $\eta_p = 50\%$  附近减小程度最大; 而当 DG 发出无功功率时, 不同渗透率下的负荷功率极限将有所增大, 同样在渗透率为 50% 附近增大的趋势最为显著。

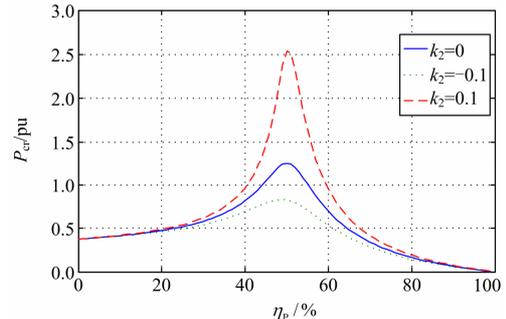


图 8 不同 DG 无功控制下负荷极限随渗透率变化

Fig. 8 Variations of the load power limit with the increase of penetration under different reactive power tactics of DG

## 3 不同无功控制策略下含分布式发电电网静态电压稳定指标计算与分析

### 3.1 含分布式发电电网静态电压稳定指标计算

文献[13]提出一种扩展线路电压稳定指标, 用以考虑线路本身和外部影响时, 分析当负荷波动时线路的电压稳定性。其计算公式为

$$ELSI = \frac{E_k^2}{2[Q_l X_l + P_l R_l + \sqrt{(P_l^2 + Q_l^2)(R_l^2 + X_l^2)}]} \geq 1 \quad (15)$$

当  $ELSI = 1$  时为线路电压稳定的临界状态, 对应线路传输功率极限。电压稳定指标值越大表明线路电压稳定性越好。若 DG 在负荷节点接入后, 其注入功率可以看成是“负”的负荷, 同样可得到类

似的线路电压稳定指标来分析当 DG 输出功率波动时接入线路的电压稳定性, 用  $E_{DG}$  表示为

$$E_{DG} = \frac{E_k^2}{2[\Delta P R_l + \Delta Q X_l + \sqrt{(\Delta P^2 + \Delta Q^2)(R_l^2 + X_l^2)}]} \geq 1 \quad (16)$$

其中  $\Delta P = P_l - P_{DG}$ ,  $\Delta Q = Q_l - Q_{DG}$  分别为等效负荷有功功率和无功功率。为比较不同无功控制策略对静态电压稳定指标的影响, 考虑 3 种 DG 无功控制策略, 1) DG 仅输出有功  $P_{DG}$ , 无功  $Q_{DG} = 0$ ; 2) DG 采用恒定功率因数控制  $Q_{DG} = k_2 P_{DG}$ , 当  $k_2 < 0$  时表示 DG 从系统吸收无功功率, 而当  $k_2 > 0$  则代表 DG 发出无功功率; 3) DG 采用恒定负荷节点电压的无功控制, 通过求解负荷电压的四次方程可得  $Q_{DG}$  为关于  $P_l$  和  $P_{DG}$  的函数关系。

### 3.2 不同无功控制策略下对比分析

根据某地区电网 10 kV 出线日负荷和 DG(光伏发电)一天内的出力波动(图 9), 可得不同无功控制策略下的静态电压稳定指标波动曲线, 如图 10 所示, 其中 DG 渗透率为 20%, 其余各参数取值与上节的算例相同。

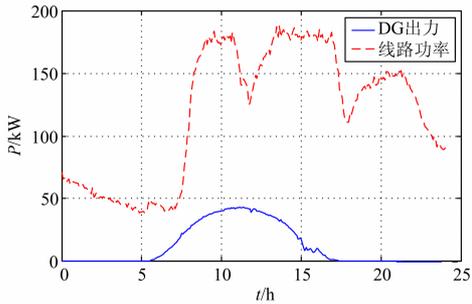
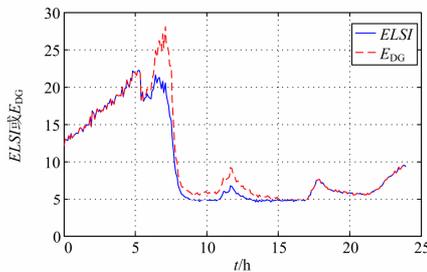
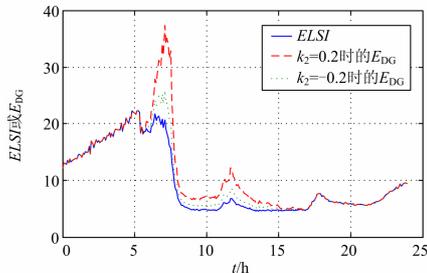


图 9 某地日负荷曲线和 DG 出力波动

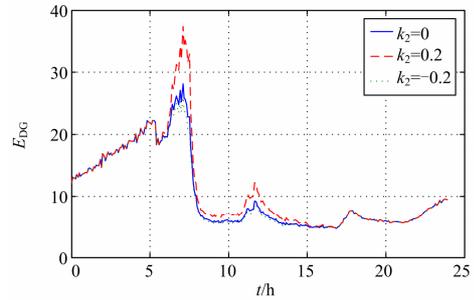
Fig. 9 Daily power fluctuation of one 10 kV feeder and the DG of Yuhang grid



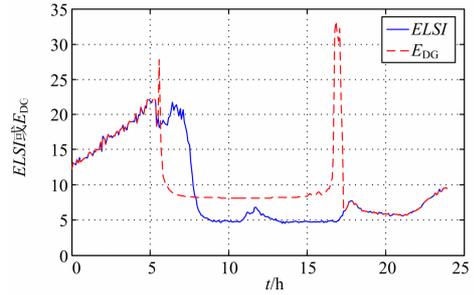
(a) DG 仅发有功和不含 DG 对比



(b) 采用恒定功率因数控制和不含 DG 对比



(c) DG 吸收、发出无功与仅发有功对比



(d) 采用恒定电压控制和不含 DG 对比

图 10 不同无功控制策略下电压稳定指标波动对比

Fig. 10 Comparison of line stability index under different reactive power control tactics

图 10(a)、10(b)和 10(d)分别显示 DG 仅输出有功功率、恒定功率因数控制和定电压控制时的  $E_{DG}$  与不含 DG 时的电压稳定指标 ELSI。图 10(c)还给出了 DG 仅输出有功、采用恒定功率因数时  $E_{DG}$  指标的对比。由图 10(a)和图 10(b)可见, DG 接入线路电压稳定指标均较未接入 DG 时有所提高, 系统静态电压稳定性增强; 由图 10(c)可见, 采用恒定功率因数控制时, DG 发出无功功率时线路的稳定性比 DG 仅发有功功率时更好, 而吸收无功时的稳定性不如仅发有功的情况, 这与 DG 接入对负荷节点电压稳定性影响结果一致; 图 10(d)表明采用恒定电压控制时, 线路电压稳定性指标波动曲线中有一段明显的平稳区间, 这是由于既要保证负荷节点电压恒定, 也需满足无功功率在允许范围造成的。

## 4 结论

本文推导了 DG 渗透率与负荷电压解析关系, 分析了 DG 渗透率增加时负荷电压、PV 特性的变化情况, 重点研究了不同无功控制策略对系统静态电压稳定的影响。研究表明, DG 仅发出有功时随着渗透率的增大, 负荷极限将先逐渐增大然后再减小, 最大值出现在渗透率为 50%的情况下。DG 渗透率小于 50%时, 增加渗透率可以提高承受负荷的能力, 从而提高系统的静态电压稳定性。不同无功控制策略的对比分析发现, DG 采用发无功的恒功率因数

控制更有利于线路电压的稳定性。

## 参考文献

- [1] 肖湘宁, 陈征, 刘念. 可再生能源与电动汽车充放电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 1-14.  
XIAO Xiang-ning, CHEN Zheng, LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 1-14.
- [2] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.  
LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.
- [3] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配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.  
PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.
- [4] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [5] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电对配电网影响的综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 132-136.  
ZHANG Li-mei, TANG Wei, ZHAO Yun-jun, et al. The integrated evaluation of impact of distributed generation on distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 132-136.
- [6] 邓卫, 唐西胜, 裴玮, 等. 含风电微型电网电压稳定性分析及控制技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 56-62.  
DENG Wei, TANG Xi-sheng, PEI Wei, et al. Voltage stability and control technologies of micro-grid with wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 56-62.
- [7] TONKOSKI R, TURCOTTE D, EL-FOULY T H M. Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 518-527.
- [8] 张勇军, 翟伟芳, 林建熙. 分布式发电并网的网损影响评价指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 134-137.  
ZHANG Yong-jun, ZHAI Wei-fang, LIN Jian-xi. Study on power loss evaluation index of the DG's accessing to the networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 134-137.
- [9] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.  
CHEN Hai-yan, DUAN Xian-zhong, CHEN Jin-fu. Impacts of distributed generation on steady state voltage stability of distribution system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 27-30.
- [10] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.  
LI Bin, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88.
- [11] 徐玉琴, 刘文霞, 潘雄. MLRM 法预估含风电场系统静态电压稳定裕度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 48-53.  
XU Yu-qin, LIU Wen-xia, PAN Xiong. MLRM-based estimation of static voltage stability margin of power systems with wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 48-53.
- [12] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Hybrid AC-DC microgrids with energy storages and progressive energy flow tuning[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(4): 1533-1543.
- [13] YU Juan, LI Wen-yuan, YAN Wei. A new line loadability index for radial distribution systems[J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36(11): 1245-1252.
- [14] 徐琳, 卢继平, 汪洋, 等. 电力系统节点电压稳定指标的研究[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 26-30.  
XU Lin, LU Ji-ping, WANG Yang, et al. Research on nodal voltage stability index of power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 26-30.
- [15] 周念成, 廖彦洁, 颜伟, 等. 基于相量测量的电压稳定裕度计算及减载方案[J]. 中国电力, 2012, 45(5): 6-10.  
ZHOU Nian-cheng, LIAO Yan-jie, YAN Wei, et al. Voltage stability margin computation and under-voltage load shedding scheme based on phasor measurement[J]. Electric Power, 2012, 45(5): 6-10.

收稿日期: 2013-09-03; 修回日期: 2014-03-12

作者简介:

李题印(1983-), 男, 硕士, 工程师, 技师, 从事电力系统信息管理工作;

韩永强(1977-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统信息管理工作;

胡晓琴(1982-), 女, 硕士, 工程师, 从事电力科技项目管理工。