

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.05.014

分布式电源并网对配电网的影响

雷敏¹, 杨万里¹, 李丹¹, 张骏杰²

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲电力勘测设计科研有限责任公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 针对分布式电源并网问题, 定量分析了分布式电源 DG 对配电网网损和电压产生的影响。简述了 DG 的类型和潮流计算模型, 以及各种潮流计算模型的处理方法; 应用 PSASP 软件对 IEEE 30 节点系统进行潮流计算, 定量分析 DG 的位置和容量对配电网网损和电压产生的影响。仿真结果表明: 分布式电源并网位置相同时, 并网容量越大, 对系统节点电压和有功网损的影响越大; 分布式电源并网容量相同时, 并网位置越靠近系统末端, 对系统电压的提升作用越明显, 且对并网位置及其附近处的电压支撑作用最强。

关键词: 分布式电源; 配电网; 潮流计算

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)05-0068-06

Effect of Distributed Generation Grid-Connection on Distribution System

Lei Min¹, Yang Wanli¹, Li Dan¹, Zhang Junjie²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Zhuzhou Electric Power Survey and Design Research Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412000, China)

Abstract: In view of distributed generation grid-connected problems, analyzed the impact of distributed generation on active power loss and voltage. Described DG type and power flow calculation model and introduced the methods about various flow calculation models. Calculated power flow in IEEE 30 node system by PSASP software and analyzed the impact of DG position and capacity on active power loss and voltage. The simulated results showed that when the distributed generation in the same position interconnected, the larger capacity of distributed generation has a relative larger influence on active power loss and the node voltage; when the distributed generation in the same capacity interconnected, the grid-connected position is closer to the end of the system, the system voltage promoting is more obvious and the enhancing for voltage is highest in the grid-connected position and its vicinity.

Keywords: distribution generation; distribution network; power flow calculation

0 引言

随着世界经济的快速发展和人们生活水平的不断提高, 人类对能源的需求越来越大。传统化石能源的不可再生性和日益严峻的环境问题, 使人们开始把目光转向新型清洁能源。将水能、风能、太阳能、生物质能等新型能源与分布式发电技术、电网

技术相结合, 产生了电力系统领域的一大研究热点——分布式电源并网。随着国家智能电网发展战略的提出, 分布式电源并网成为了智能电网的重要技术特征。分布式电源 (distributed generation, DG) 一般是接在用户侧附近的小型发电机组或发电及储能的联合系统, 可以满足某些用户的特殊要求。随着用户对供电量和供电安全可靠性的提高, 迫切

收稿日期: 2014-07-02

作者简介: 雷敏 (1973-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事复杂网络理论及其在电网稳定性分析中的应用等方面的研究, E-mail: 13607331653@163.com

需要改善配电网的供电质量。由于 DG 具有投资省、建设周期短、灵活性高等优点^[1-3], 因此, 受到广泛关注。但是, DG 并网改变了配电网网架结构, 对原配电网的稳定性和安全性均产生了重大影响^[4-6], 主要包括: 配电网电压波动、闪变, 配电网网损增大, 继电保护动作可靠性低, 配电网谐波增大等。

综上所述, 本文从配电网运行的经济性和安全性角度考虑, 定量分析分布式电源并网对配电网的影响, 揭示分布式电源对配电网的电压和有功网损的影响规律。这对分布式电源的应用具有重要的理论价值和现实意义。

1 分布式电源潮流计算模型

目前, 分布式电源主要有: 风力发电^[7]、光伏发电^[8]、燃料电池^[9]、微型燃气轮机^[10]、生物质能发电、小水电等。由于用途不同, 分布式电源的分类方法也不尽相同。根据并网类型, 其可分为: 直接并网型 DG 和间接并网型 DG (通过逆变器并网的 DG)。

不同类型的 DG 并网可能对配电网产生不同的影响, 因此, 在对含 DG 的配电网进行潮流计算时, 需要建立合适的 DG 模型^[11]。通常, DG 并不参与系统频率的调节, 因此, 本文将 DG 的有功功率 P 按恒定输出来考虑。

1.1 风力发电

风力发电机组通常有 2 类: 一类是异步双馈发电机组; 一类是永磁同步发电机组。异步双馈发电机组使用较为广泛, 技术也较为成熟。由于其本身没有励磁装置, 并网后需要从电网或电容器中吸收无功功率来建立磁场, 其吸收的无功功率 Q 随机端电压 U 的变化而变化, 二者之间的关系式为

$$Q = -\frac{U^2}{x_m} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P^2x_\sigma^2}}{2x_\sigma}, \quad (1)$$

式中: x_m 为激磁电抗; x_σ 为漏抗。

由式 (1) 可知, 异步双馈型风力发电机的有功功率为恒定, 无功功率由机端电压决定。因此, 将其潮流模型处理为 PQ(U) 节点, 即

$$\begin{cases} P = P(s), \\ Q = f(U). \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P(s)$ 表示有功功率 P 是转差率 s 的函数; $f(U)$ 表示无功功率 Q 是机端电压 U 的函数。

在潮流计算时, 可在下一次迭代计算之前, 根据式 (1) 计算出无功功率 Q 。下一次迭代计算时可以认为无功功率 Q 恒定, 再将 PQ(U) 节点转化为 PQ 节点处理。

1.2 光伏发电

光伏电池是一种直接将太阳能转化为直流电的装置, 其并网需要通过逆变器将直流电转换为与电网同频同相的交流电。光伏逆变器通常有电流控制型和电压控制型 2 种。对于电流控制型逆变器, 其注入电流和输出有功功率恒定, 此时, 电网注入无功功率 Q 可由下式计算得到,

$$Q = \sqrt{|I|^2(e^2 + f^2) - P^2}, \quad (3)$$

式中: I 为电网的注入电流; e, f 分别为 DG 并网电压的实部和虚部。

在潮流计算中, 将每次迭代得到的电压实部和虚部代入式 (3) 中, 得到其注入无功功率, 进而可将其转化为 PQ 节点进行处理。

电压控制型逆变器的输出有功功率和电压均为恒定值, 因此, 可将其作为 PV 节点处理。当注入电流越界后, 则可将其转化为电流控制型来处理。

1.3 燃料电池

与光伏电池类似, 燃料电池也是一种输出直流电能装置, 其并网发电是经过逆变器将直流电转化为交流电。燃料电池的输出有功功率 P 和无功功率 Q 可表示为:

$$\begin{cases} P = \frac{mU_{FC}U_s}{X_T} \sin(\psi), \\ Q = \frac{mU_{FC}U_s}{X_T} \cos(\psi) - \frac{U_s^2}{X_T}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{FC} 为燃料电池输出的直流电压; U_s 为并网母线电压; X_T 为变压器的等效阻抗; m, ψ 为参数。

从式 (4) 可知, 可将燃料电池的潮流计算模型处理为 PV 节点; 如果并网的无功功率越限, 则将其处理为 PQ 节点。

1.4 微型燃气轮机

与普通同步发电机的工作原理类似, 微型燃气轮机也有调速和励磁系统, 其产生的高频交流电需先经过整流器, 再经逆变器, 转换成工频交流电后, 才能实现并网。其输出的有功功率可以根据负荷水平由调速系统进行控制, 其输出电压由励磁系统和电力电子装置进行控制。因此, 其潮流计算模型可以处理为 PV 节点; 如果在潮流计算中出现无功功率越限, 则可将其处理为 PQ 节点。

2 潮流算法

与传统电力系统的潮流计算方法不同, 含 DG 的配电网不仅包含传统集中式电源, 还可能同时包含不同类型的 DG。DG 的潮流计算模型与传统发电机组

的计算模型也不完全相同。由于 DG 的特殊性，有时会基于不同方面的要求对 DG 的节点类型进行统筹考虑。根据电力系统状态变量的不同，可将算法分为：节点法和支路法，如 Newton 法、Newton-Raphson 法、P-Q 分解法等均属于典型的节点法，前推回代法^[12]、回路阻抗法等则属于支路法。

DG 并网后，可能会出现多电源环网或多类型 DG 并存等传统配电网潮流算法较难处理的问题，因此，需要对传统的配电网潮流算法进行改进。Newton-Raphson 法具有二阶收敛性，在收敛速度和迭代次数方面具有较大优势，且具有编程简单、多电源处理能力等优点。综上所述，本文采用 Newton-Raphson 法进行潮流计算。算法模型如下：

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \\ \Delta Q_i = Q_i - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = -\mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \Delta U} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \Delta U} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(5)~(7)中： ΔP 、 ΔQ 为潮流方程的残差； $\Delta \theta$ 、 ΔU 为母线电压的修正量； G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点*i*与节点*j*之间支路电导和支路电纳； V_i 、 V_j 分别为节点*i*与节点*j*的电压幅值； θ_{ij} 为节点*i*与节点*j*的电压相角差； \mathbf{J} 为雅可比矩阵； θ 为电压相角； U 为电压幅值。

3 算例分析

为定量分析 DG 并网对配电网的网损和电压的影响及其规律，本文以 PSASP 6.26 为仿真平台，对 IEEE 30 节点系统进行仿真分析。在 IEEE 30 节点系统中，基准容量取 100 MVA，计算精度为 $\varepsilon=10^{-4}$ 。图 1 为 IEEE 30 节点系统结构^[13]。

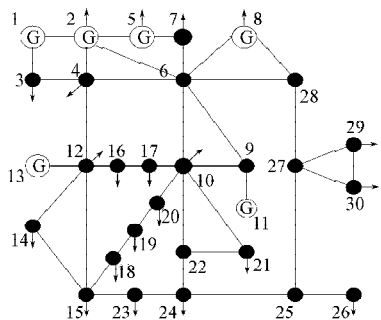


图 1 IEEE 30 节点系统
Fig. 1 IEEE 30 node system

3.1 DG 并网对配电网网损影响

本文以 PQ 型 DG 为例，对 IEEE 30 节点系统进行仿真，分别分析并网 DG 的容量和位置对配电网网损的影响，以下是具体的分析过程。

1) DG 容量对配电网网损的影响

本文将 DG 容量按 IEEE 30 节点系统总负荷（总负荷为 $2.834+j1.262$ ，采用标么值表示）的 0.4、0.8、1.0、1.2、2.0、2.4 进行配置，再分别将其并入节点 6、9、22、25、28 进行仿真。不同容量 DG 并网的网损仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同容量 DG 并网的网损

Table 1 The power loss for different capacity DG

并网节点号	并网 DG 容量倍数	有功网损 / 标么值
6	0	0.053 55
	0.4	0.026 54
	0.8	0.073 79
	1.0	0.122 47
	1.2	0.186 47
	2.0	0.585 40
9	2.4	0.863 61
	0.4	0.030 16
	0.8	0.084 84
	1.0	0.139 84
	1.2	0.212 38
	2.0	0.686 25
22	2.4	1.064 68
	0.4	0.050 98
	0.8	0.177 62
	1.0	0.278 90
	1.2	0.403 03
	2.0	1.121 13
25	2.4	1.627 88
	0.4	0.115 90
	0.8	0.177 62
	1.0	0.548 35
	1.2	0.772 90
	2.0	不收敛
28	2.4	不收敛
	0.4	0.036 82
	0.8	0.125 90
	1.0	0.202 51
	1.2	0.298 69
	2.0	0.860 46
	2.4	1.237 30

注：0 倍并网 DG 容量为无 DG 并网，下同。

由表 1 可知：当并网位置相同时，0.4 倍 DG 容量并网的网损最小；随着 DG 容量的增加，系统网损随之增大。由此可知，并网 DG 容量与系统负荷的相对值对系统网损的变化有重要影响。

2) DG 位置对配电网网损的影响

本文将 DG 容量按总负荷的 0.4、0.8、1.0、1.2、2.0、2.4 的比例进行配置之后，分别将其并入节点 6、9、22、25、

28进行仿真。DG在不同位置并网的网损仿真结果如表2所示。从表2可以看出:并网DG容量相同时,在节点6处系统网损最小,而随着并网节点号的增大(即并网位置越靠近系统末端),系统网损呈现出先增大后减小的变化趋势;与无DG并网相比,当并网容量为0.4倍总负荷时,DG在节点6,9,22,28处并网均能有效降损,当并网容量超过0.4倍总负荷时,并网网损虽然都增大了,但网损增加的幅度依然受并网位置的影响。由此可知,DG并网位置对系统网损有较大影响,而能否有效降损不仅与并网位置有关,还与并网容量有较大关系。

表2 DG在不同位置并网的网损

Table 2 The power loss of DG at different grid-connected position

并网 DG 容量倍数	并网节点号	有功网损 / 标么值
0.4	0	0.053 55
	6	0.026 54
	9	0.030 16
	22	0.050 98
	25	0.115 90
	28	0.036 82
0.8	6	0.073 79
	9	0.084 84
	22	0.177 62
	25	0.363 72
	28	0.125 90
	1.0	6
9		0.139 84
22		0.278 90
25		0.548 35
28		0.202 51
1.2		6
	9	0.212 38
	22	0.403 03
	25	0.772 90
	28	0.298 69
	2.0	6
9		0.686 25
22		1.121 13
25		不收敛
28		0.860 46
2.4		6
	9	1.064 68
	22	1.627 88
	25	不收敛
	28	1.237 30

3.2 DG 并网对配电网电压影响

本文以PQ型DG为例对IEEE 30节点系统进行仿真实验,从DG容量和位置2个方面分析DG并网对配电网电压的影响。

1) DG 容量对配电网电压的影响

定量分析了DG容量对配电网电压的影响,分

析方法与上节方法类似。将DG容量按总负荷的0.4, 0.8, 1.0, 1.2, 2.0的比例进行配置,然后分别将其并入节点6,9,22,25,28进行仿真。不同容量DG并网的电压仿真结果如表3所示。从表3可以看出,在DG并网位置相同时,并网容量越大,对系统电压的提升作用越明显,对系统电压的支撑能力越强。

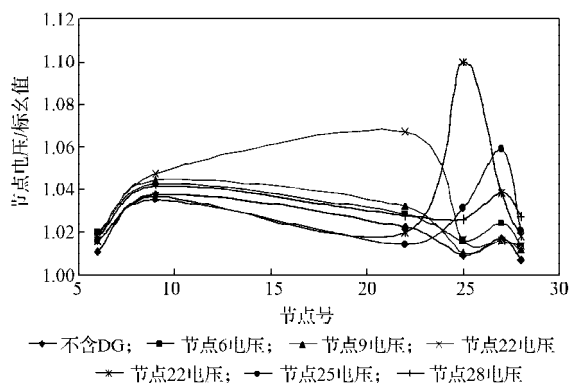
表3 不同容量DG并网的电压

Table 3 The voltage of different capacity DG grid-connected

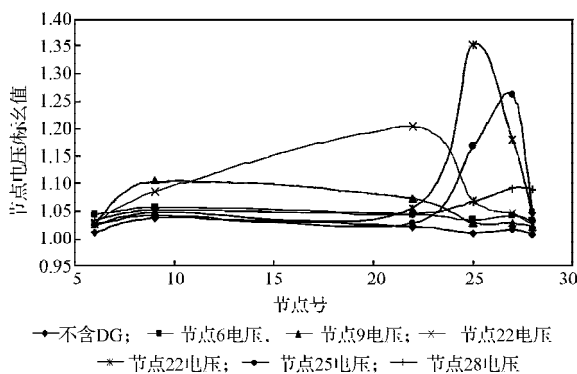
并网 DG 位置	并网 容量 倍数	电压 / 标么值				
		节点 6	节点 9	节点 22	节点 25	节点 28
节点 6	0	1.011 00	1.037 50	1.022 20	1.009 30	1.006 90
	0.4	1.019 50	1.042 63	1.028 34	1.015 98	1.013 37
	0.8	1.043 52	1.056 87	1.043 63	1.033 21	1.031 73
	1.0	1.050 49	1.061 03	1.048 13	1.038 28	1.037 05
	1.2	1.057 07	1.064 94	1.052 34	1.043 04	1.042 07
	2.0	1.079 80	1.078 23	1.066 43	1.059 11	1.059 36
节点 9	0.4	1.017 84	1.044 51	1.031 97	1.010 39	1.012 21
	0.8	1.029 37	1.106 27	1.073 36	1.028 09	1.022 09
	1.0	1.030 90	1.116 27	1.078 99	1.027 36	1.023 25
	1.2	1.031 25	1.123 58	1.081 89	1.024 49	1.023 38
	2.0	1.018 52	1.120 80	1.060 00	0.986 00	1.011 63
	节点 22	0.4	1.018 28	1.047 51	1.067 11	1.016 54
0.8		1.029 73	1.085 52	1.203 00	1.068 44	1.025 85
1.0		1.031 32	1.089 95	1.232 88	1.072 48	1.027 33
1.2		1.031 89	1.091 99	1.258 43	1.073 12	1.027 76
2.0		1.024 04	1.075 35	1.320 47	1.039 83	1.018 70
节点 25		0.4	1.015 94	1.036 31	1.019 57	1.099 82
	0.8	1.024 71	1.047 84	1.053 38	1.352 09	1.040 58
	1.0	1.023 91	1.043 25	1.044 29	1.392 89	1.039 99
	1.2	1.021 51	1.035 80	1.028 24	1.419 32	1.035 87
	2.0	不收敛	不收敛	不收敛	不收敛	不收敛
	节点 28	0.4	1.017 35	1.041 56	1.028 05	1.025 96
0.8		1.033 37	1.052 52	1.043 25	1.066 39	1.089 18
1.0		1.036 94	1.054 98	1.046 76	1.077 56	1.106 06
1.2		1.039 87	1.057 02	1.049 73	1.087 75	1.121 79
2.0		1.045 38	1.060 91	1.056 11	1.119 51	1.174 49

2) DG 位置对配电网电压的影响

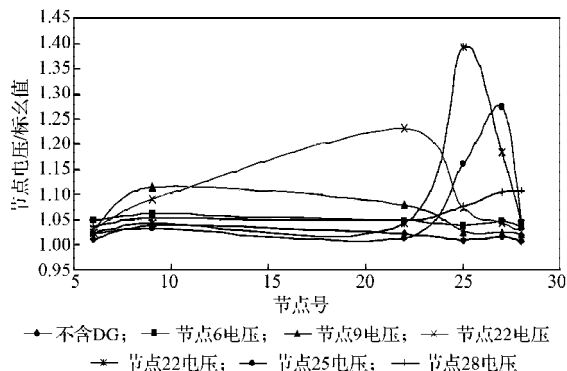
本文将DG容量按总负荷的0.4, 0.8, 1.0, 1.2, 2.0, 2.4的比例进行配置之后,分别将其并入节点6,9,22,25,27,28进行仿真,仿真结果如图2所示。



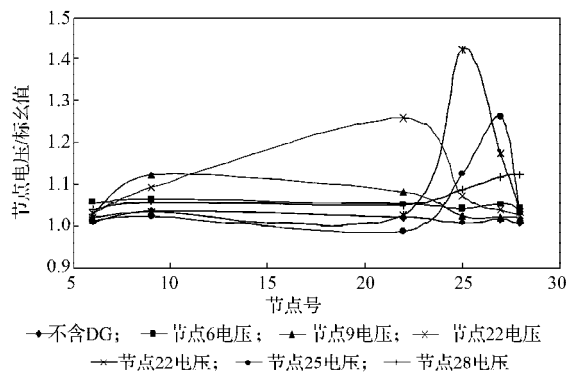
a) 0.4倍容量DG并网



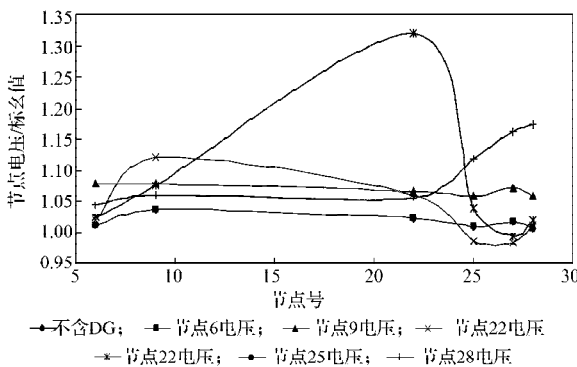
b) 0.8 倍容量 DG 并网



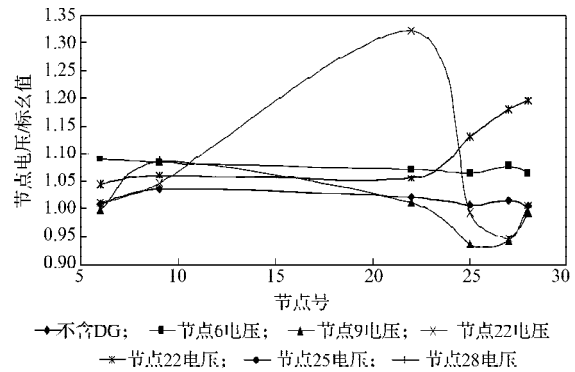
c) 1.0 倍容量 DG 并网



d) 1.2 倍容量 DG 并网



e) 2.0 倍容量 DG 并网



f) 2.4 倍容量 DG 并网

图2 并网DG容量与节点电压的关系曲线

Fig. 2 The relative curve of node voltage and grid-connected DG capacity

从图2可以看出:当DG并网容量相同时,DG的并网位置越靠近系统末端,对系统电压的提升作用越明显,而且越靠近DG并网位置的节点,其电压提升越明显,且对并网点本身的电压提升最大。

4 结论

本文通过定量分析DG并网的容量和位置对配电网损耗和电压产生的影响,得出如下结论:

1) 不同容量DG接入配电网的相同位置时,容量较大的DG并网对系统节点电压和有功网损的影响较大。

2) 相同容量DG接入配电网的不同位置时,DG的并网位置越靠近系统末端,对系统电压的提升作用越明显,而且越靠近DG并网位置的节点,其电压提升越明显,且对并网点本身的电压提升最大。

参考文献:

- [1] 彭谦,姜彤,杨以涵,等.快速三相高斯潮流算法[J].中国电机工程学报,2009,29(4):48-52.
Peng Qian, Jiang Tong, Yang Yihan, et al. Fast Three-Phase Gauss Load Flow Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 48-52.
- [2] 陈海焱,陈金富,段献忠.含分布式电源的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2006,30(1):35-40.
Chen Haiyan, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. Study on Power Flow Calculation of Distribution System with DGs [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40.
- [3] 赵晶晶,李新,许中.含分布式电源的三相不平衡配电网潮流计算[J].电网技术,2009,33(3):94-98.
Zhao Jingjing, Li Xin, Xu Zhong. Calculation of Three-Phase Unbalanced Power Flow in Distribution Network

- Containing Distributed Generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 94-98.
- [4] Van Thong V, Vandenbrande E, Soens J, et al. Influences of Large Penetration of Distributed Generation on N-1 Safety Operation[C]//2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver: IEEE, 2004: 2177-2181.
- [5] Cardell J, Ilic M. Maintaining Stability with Distributed Generation in a Restructured Industry[C]//2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver: IEEE, 2004: 2142-2149.
- [6] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31.
- Chi Yongning, Wang Weisheng, Dai Huizhu. Study on Transient Voltage Stability Enhancement of Grid-Connected Wind Farm with Doubly Fed Induction Generator Installations[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 25-31.
- [7] 李军军, 吴政球, 谭勋琼, 等. 风力发电及其技术发展综述[J]. 电力建设, 2011, 32(8): 64-72.
- Li Junjun, Wu Zhenqiu, Tan Xunqiong, et al. Review of Wind Power Generation and Relative Technology Development[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 64-72.
- [8] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.
- Liu Dongran, Chen Shuyong, Ma Min, et al. A Review on Models for Photovoltaic Generation System[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 47-52.
- [9] 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012, 18(1): 1-13.
- Hou Ming, Yi Baolian. Progress and Perspective of Fuel Cell Technology[J]. Journal of Electrochemistry, 2012, 18(1): 1-13.
- [10] 杨秀, 郭贤, 臧海洋, 等. 微型燃气轮机发电系统孤岛及并网运行建模与控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 63-68.
- Yang Xiu, Guo Xian, Zang Haiyang, et al. Modeling and Control Strategy of Islanding and Grid-Connected Operation of a Micro-Turbine Generation System[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 63-68.
- [11] 彭彬, 刘宁, 吴迪. 配电网潮流计算中的分布式电源建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 152-156.
- Peng Bin, Liu Ning, Wu Di. Modeling of Distributed Generation for Distribution System Power Flow Calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(2): 152-156.
- [12] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.
- Zhang Limei, Tang Wei. Back/Forward Sweep Power Flow Calculation Method of Distribution Networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [13] 陈树勇, 常晓鹏, 孙华东, 等. 风电场接入对电力系统阻尼特性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1570-1577.
- Chen Shuyong, Chang Xiaopeng, Sun Huadong, et al. Impact of Grid-Connected Wind Farm on Damping Performance of Power System[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1570-1577.

(责任编辑: 邓彬)