

文章编号: 1006-4710(2013)01-0070-06

基于禁忌搜索算法的含风电机组的 配电网无功优化研究

余健明, 刘飞

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 随着分布式电源的快速发展,含分布式电源的配电网无功优化对电能质量的提高以及网络损耗的降低有重要意义。研究基于风速的随机变化特点和概率思想的场景决策法,构建了以电压不越线为约束条件,网络损耗最小为目标函数的含风电机组的配电网无功优化数学模型。采用一种自适应长度的集中性和多样性的禁忌搜索算法,对含风电机组的配电网进行无功优化。应用美国 PG&E69 节点算例进行计算分析,与简单禁忌搜索算法进行对比,验证了该算法的可行性和优越性。本研究结果对含风电机组的配电系统的实际优化运行具有一定的参考价值。

关键词: 分布式发电;风电机组;无功优化;自适应长度;集中性与多样性;禁忌搜索算法

中图分类号: TM712

文献标志码: A

Research on Reactive Power Optimization of the Distribution Network With Wind Power Generation Base on Tabu Search

YU Jianming, LIU Fei

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the rapid development of distributed generation, reactive power optimization in distribution network with DG is important significant to improve power quality and reduce network losses. Reactive power optimization mathematical model is constructed based on scenes decision-making method of probabilistic thinking, which takes the smallest loss and node voltage constraints and random variation of the wind speed into consideration. The improved tabu search algorithm, which is a intensification and diversification of self-adaptive length, is applied to solving of the reactive power optimization problem in distribution network with wind turbine. Finally, this improved algorithm is used to calculate and analyze the United States PG&E69 bus test case, the result shows that this algorithm is more feasible and superior to simple tabu search. The study case has a certain reference value on actual optimal operation of distribution system with wind power.

Key words: distributed system; wind power generation; reactive power optimization; self-adaptive length; intensification and diversification; tabu search algorithm

近年来,随着经济的迅速发展能源短缺和环境
污染成为世界各国共同面临的难题,风力发电作为
可再生的绿色能源,显现出了巨大的应用前景。大
型风电场的接入对系统潮流、电能质量以及系统运
行的稳定性和可靠性等会产生一系列重大的影响^[1-2]。然而,无功优化是实现电网经济调度,保证
电能质量和安全经济运行的重要手段,但是目前配
电网很难根据无功需求的变化及时调整补偿容量。

因此,含有分布式电源的配电网无功优化具有重大
意义。

传统配电网无功优化方案中,影响无功优化结
果的不确定因素是负荷的波动。风电接入后风电
机组的输出功率受风速随机波动的影响很大,配
电网中的不确定因素增多^[3]。相比负荷变化,风
速的变化更加频繁。为了研究方便,突出风电对
大电网的影响,笔者研究了分布式电源中发展较
为成熟的风

收稿日期: 2012-07-09

作者简介: 余健明,男,教授,研究方向为配电网自动化和电能质量。E-mail: jianmingyu@xaut.edu.cn。

力发电机组并网后配电网的无功优化问题。参考文献[4]中风电机组的输出功率随风速随机变化的特点,将风电机组分为三种运行状态,即额定运行、欠额定运行和停机状态,由风机各运行状态发生的概率,计算出风机有功输出的期望,近似代替随机变化的有功输出。解决了含风电机组无功优化中风机输出的不确定问题,并在此基础上应用自适应长度的集中性与多样性禁忌搜索算法对含风电机组的配电网进行无功优化研究。

1 风电机组输出功率的波动性模型

风电机组的输出功率受风速影响,因此具有一定的波动性,本研究基于概率思想确定了风电机组的功率输出^[3-8],风力发电机的输出功率与风速的关系曲线见图1。

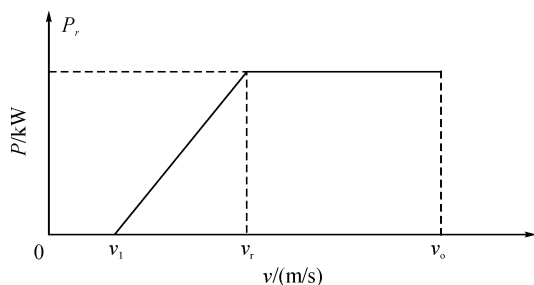


图1 风电机组功率特性曲线

Fig.1 Power curve of wind power generator

图1中, P_r 是风力发电机组的额定输出功率, v_i 、 v_r 、 v_o 分别为风机切入、额定和切除风速。图1所示风电机组的三种运行工况分别是停机状态($v \leq v_i$ 或 $v \geq v_o$),功率输出为0;欠额定状态($v_i < v < v_r$),功率输出介于0和额定输出功率 P_r 之间;额定运行状态($v_r < v < v_o$),功率输出为风力发电机组的额定值 P_r 。

一般风速是不可控的随机变量,因此,风电机组的输出功率也是不可控的随机变量。目前国内外许多学者对风速分布进行了研究,有学者应用自回归移动平均法来模拟风速^[9]。Spahic等分析了欧洲北海地区2003—2005年间的风速数据,分析结果认定年风速分布近似于Weibull分布^[10-11],Weibull分布的两个参数为尺度参数 c 和形状参数 k ,其概率密度函数 $f(v)$ 和分布函数 $F(v)$ 见式(1)和式(2)。

$$F(v) = 1 - e^{-(v/c)^k} \quad (1)$$

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (2)$$

Weibull分布的两个参数 c 和 k 分别取8.5和2.0时的概率密度分布曲线,见图2。根据现场实测

风速的历史数据,在已知风速随机分布参数的条件下,计算出风电机组输出功率在额定、停机、欠额定运行状态下发生的概率 $h\{ob_1\}$ 、 $h\{ob_2\}$ 、 $h\{ob_3\}$ 。计算公式^[4]为:

$$h\{ob_1\} = h\{v_r < v \leq v_o\} = \int_{v_r}^{v_o} f_v(v) dv \quad (3)$$

$$h\{ob_2\} = h\{v \leq v_i\} + h\{v > v_o\} = 1 - \int_0^{v_o} f_v(v) dv + \int_0^{v_i} f_v(v) dv \quad (4)$$

$$h\{ob_3\} = h\{v_i < v \leq v_r\} = \int_{v_i}^{v_r} f_v(v) dv \quad (5)$$

由此求得风电机组的功率期望 P 为:

$$P = \sum_{i=1}^3 (P_i h\{ob_i\}) = P_r h\{ob_1\} + \frac{1}{2} P_r h\{ob_3\} \quad (6)$$

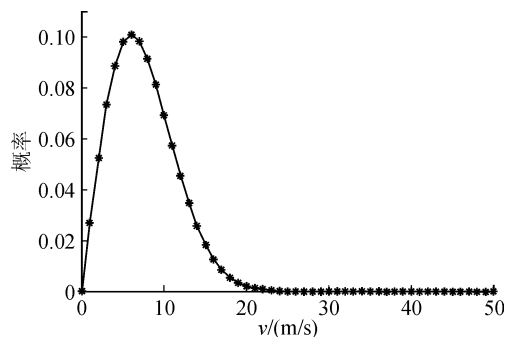


图2 Weibull风速分布图

Fig.2 Weibull wind speed distributions

如此, P 可以近似代替随机变化的有功输出,解决了风电机组功率变化的随机性问题。

2 计及风电机组的配电网无功优化的数学模型

配电网无功优化问题是一个含大量离散和连续控制变量的多目标、多约束、并存在不确定性的非线性混合整数组合的优化难题,且优化的目标函数有时不可微。因而优化过程十分复杂^[12]。针对电力系统无功优化的特点,国内外专家学者们将各种优化算法应用于该领域。目前研究的不同之处在于,目标函数不同、约束条件不同以及优化算法不同。

2.1 目标函数的确定

由于以电压不越线为约束条件,所以目标函数仅考虑了网络损耗,并且通过牛顿拉夫逊潮流计算得出,公式为:

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1, i \neq H}^n G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i^2 U_j^2 \cos\theta_{ij}) \quad (7)$$

2.2 约束条件

① 潮流约束为:

$$P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij});$$

$$Q_{ii} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij});$$

② 节点电压约束条件为:

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}$$

即要求节点电压不越线。如果节点电压越线,则把不符合节点电压约束条件的解向量直接删除。

③ 电容器组的投入组数不越线,即:

$$Q_{c\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{c\max}$$

其中, P_i 、 Q_i 、 U_i 、 Q_{ci} 、 σ_{ij} 、 G_{ij} 、 B_{ij} 、 U_{\max} 、 U_{\min} 、 $Q_{c\max}$ 、 $Q_{c\min}$ 分别代表节点 i 注入的有功、无功、电压幅值、无功补偿容量、节点 i 和 j 之间的相角、电导、电纳、节点电压上下线以及补偿容量上下线。

2.3 配电网无功优化中风电机组的处理

一般风电场是由多台风电机组按照一定规则排列而成的,风电场的功率为所有风电机组输出功率之和。在潮流计算时,把风电场等效为一台发电机,接入电网的母线等效为一个节点^[2]。双馈感应机与同步风机均属于变速恒频的风电机组,可通过变频控制系统对发电机的有功和无功功率实现解耦控制,以此调节改善风电场的功率因数及电压稳定性。因此,在潮流计算中可作为 PQ 节点处理^[13]。

所以,已知双馈式变速恒频风力发电机组的风机功率曲线、转速特性曲线、风机额定功率、风电机组功率因数以及定子侧机端电压就可以近似将其当成 PQ 节点处理。从而应用牛顿拉夫逊方法进行潮流计算。

3 基于禁忌搜索算法的无功优化参数选择及流程

禁忌搜索方法是 Glover F^[14] 在 1986 年首次提出的一种智能启发式算法。鉴于禁忌搜索算法是对局部邻域搜索的一种扩展,通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,并通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态,进而保证有效探索,最终实现全局最优化。由于配电网无功优化问题相当复杂,需要降低算法对初始解向量的依赖程度,增强收敛速度,减少搜索时间,本研究采用自适应长度的集中性和多样性禁忌搜索算法^[15-16] 解决含风电机组的配电网无功优化问题。算法改进主要体现在邻域解集和候选解集的控制策略上。

3.1 算法参数选择

① 适配值及解空间

最小网络损耗为对应的适配值函数,由牛顿拉

夫逊潮流计算得出。

节点和对应节点的补偿容量为所要求的解向量 $X = [n_i, n_j, \dots, n_i, Q_{ci}, Q_{cj}, \dots, Q_{cm}]$; n_i 为节点编号, Q_{ci} 为对应节点的补偿容量。

② 初始解

初始解对收敛速度和能否跳出全局最优有一定的影响。由于采用的是自适应长度的集中性与多样性搜索策略,降低了其对初始解的敏感性,并且多样性解是随机得到的,所以本研究采用随机产生满足电压约束条件的初始解。

③ 邻域控制策略

邻域搜索由集中性和多样性搜索两部分组成。将邻域分为两部分,前半部分元素称为集中性元素,用于集中性搜索,即搜索相邻的节点元素和补偿电容器的相邻组数。后半部分元素称为多样性元素,用于多样性搜索,即除前部分解向量和禁忌表中的解向量外随机产生满足电压约束条件的解向量。

④ 候选解控制策略

自适应长度的集中性和多样性搜索策略,将候选集中的元素与邻域对应分为两部分,前半部分从邻域的前半部分中选择最佳的解向量组成,称为集中性候选解集。后半部分从邻域的后半部分元素中随机选取组成,称为多样性候选解集。程序运行过程中,集中性元素和多样性元素的个数根据搜索过程中解的质量动态变化。设候选集长度为 CL , 候选集中集中性元素和多样性元素的分界点长度记为 DL , 即第 1 至 DL 个元素为集中性元素,后 $DL + 1$ 至 CL 个元素为多样性元素。在迭代之前,前 $CL/2$ 为集中性元素组成的候选解集。后 $CL/2$ 为多样性元素组成的候选解集。迭代过程中,如果当前最优解出自集中性元素,则对应的集中性元素个数变为 $DL + 1$, 多样性元素个数变为 $CL - DL - 1$, 如果当前解出自多样性元素,则集中性元素个数变为 $DL - 1$, 多样性元素个数变为 $CL - DL + 1$, 如此构成了自适应长度的集中性和多样性搜索的候选解集。

DL 按上述规则动态地变化使得解的质量有提高时,候选集中的集中性元素增多,即进行集中性搜索的概率增大。相应地,多样性搜索的概率降低。反之,当解的质量没有提高时候选集中的集中性元素减少,即进行集中性搜索的概率减少,相应地,多样性搜索的概率提高。这样,就能根据搜索进程中解的质量好坏自动地进行集中性搜索或多样性搜索^[16]。

⑤ 禁忌对象

禁忌对象是当前解的各状态量,即补偿节点和

对应的补偿容量。

⑥ 禁忌表及禁忌长度

采用明晰记忆,即将搜索过的当前解的状态量放入禁忌表,把已经搜索过的节点和对应节点的容量放入禁忌表,以免再次搜索访问。

禁忌长度是禁忌对象在禁忌表中的任期,根据计算的规模大小选取。在对应的配电网节点数不多时一般取5。

⑦ 终止准则

终止准则设定为目前最优值,即“best so far”对应的目标函数值连续不变的迭代的次数。

3.2 算法流程

算法流程见图3。

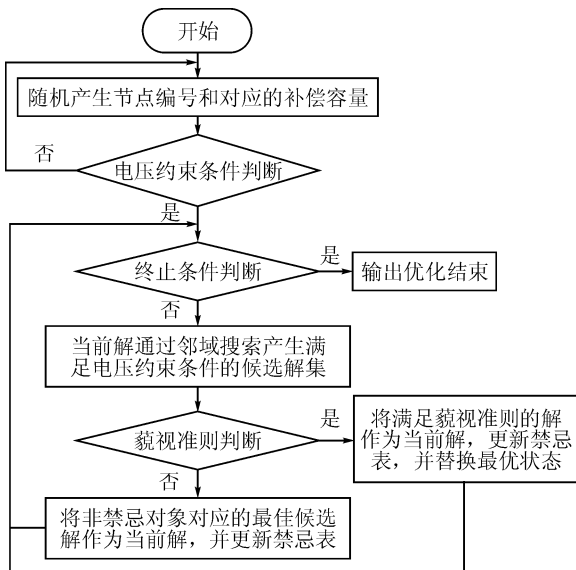


图3 无功优化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of reactive power optimization

4 算例验证

测试系统见图4的美国PG&E69节点辐射状配电系统^[17],系统总有功负荷为3 802.19 kW,总无功负荷为2 604.60 kvar,线电压基准值为12.66 kV。自适应长度的集中性与多样性的禁忌搜索算法中候选解集总个数选20组,其中初始的集中性候选解和多样性候选解集各10组。自适应长度调节过程中,集中性解和多样性解最少不少于5组,最多不超过15组,禁忌表长为5,禁忌步长为5,最优值保持100次不变为程序终止条件。程序算法使用MATLAB R2010a语言实现。

参考文献[1]中假设风电机组馈线末端54节点处安装1台采用异步发电机的风电机组,额定容量为600 kW,切入风速为5 m/s,额定风速为8 m/s,切出

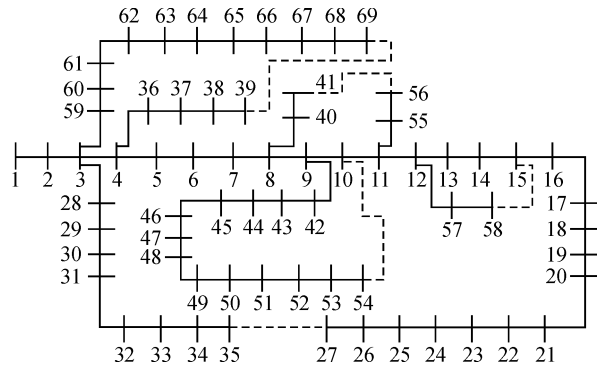


图4 PG&E69节点网络拓扑图

Fig. 4 PG&E69-bus test distribution system

风速分别为22 m/s, Weibull分布参数 c 和 k 分别为8.5和2.0。测试中选取风电机组的三种典型运行场景,分别是额定运行、停机和欠额定运行,额定运行和停机的输出功率分别为0.6 MW和0 MW,在欠额定运行场景下分别选取A、B、C三个状态,它们分别运行在额定功率为25%、50%和75%的状态下,即相应的有功输出分别是0.15 MW、0.3 MW、0.45 MW。风电机组采用变速恒频双馈发电机,双馈发电机定子侧无功功率可以调节,取功率因数 $\cos\varphi = 0.95$,因此可对应风电机组的额定运行和停机场景的无功功率分别是0.2 Mvar和0 Mvar,而在欠额定运行场景下的三个状态A、B、C对应的无功功率分别为0.05 Mvar、0.1 Mvar和0.15 Mvar。按公式(3)、(4)、(5)计算出额定、停机和欠额定场景发生的概率分别为0.41、0.29和0.30。根据概率理论可求出此台风力发电机输出的有功和无功期望值分别为0.336 MW、0.11 Mvar。在优化结果中,每组电容器容量为50 kvar,括号中为对应节点电容器补偿组数。表1为风电机组功率输出在期望值下改进的禁忌搜索算法和简单禁忌搜索算法的优化结果对比。表2是在基于风电机组功率输出在期望值下选定无功优化节点后,风电机组运行在三种场景下对应的优化结果。图5为功率输出在期望值下加分布式电源前后以及无功优化后的节点电压对比。

表1 风电机组工作在期望值下的优化结果对比
Tab. 1 Comparison of results from different algorithms

算法	初始网损/kW	优化结果节点/组数	网损/kW	网损降低率/%	迭代次数
简单禁忌搜索	164.21	4(13), 9(10), 20(3), 50(11),	101.43	38.23	112
改进禁忌搜索	164.21	4(10), 9(5), 20(3), 50(11),	100.13	39.02	106

表2 改进的禁忌搜索在风机各状态下的优化结果

Tab.2 Results of optimization with improved TS

风机状态	初始网损/kW	优化结果节点/组数	网损/kW	网损降低率/%
停机	224.65	4(10),9(5), 20(3),50(13);	145.28	35.33
欠额定	A	4(10),9(5), 20(3),50(12);	123.25	36.90
	B	4(10),9(4), 20(3),50(12);	104.26	38.54
	C	4(9),9(5), 20(3),50(11);	80.03	45.72
额定	128.50	4(9),9(5), 20(3),50(10);	74.60	41.95

表1表明改进的禁忌搜索算法比简单的禁忌搜索算法无功优化后网损降低率更大,迭代次数也从原来的112次降低到106次,提高了其收敛速度。风电机组工作在期望值下投入的总电容器组数也较少。因此改进的算法具有更好的优化效果。

由表2可见,风机并网运行时欠额定和额定运行,系统的有功网损从原来的224.65 kW分别降低到195.31 kW、169.65 kW、147.44 kW和128.50 kW。这是由于风电机组发出有功和无功,提供给附近的负荷节点减少了系统中的功率流动。而在配电网加入分布式电源的基础上进行无功优化后,风机在停机和额定运行时的网损降低率分别为35.33%和41.95%,欠额定运行在A、B、C三个状态下的网损降低率分别是36.90%、38.54%和45.72%,即无功优化后网络损耗明显降低。

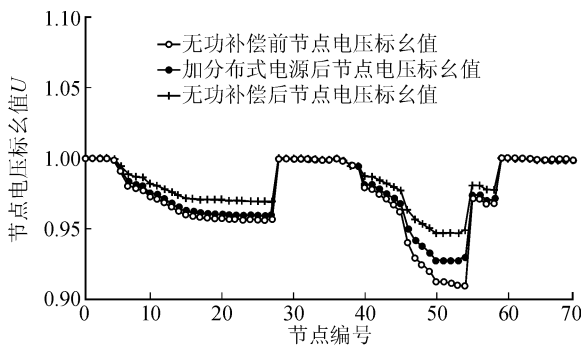


图5 加风电机组以及无功优化前后节点电压标么值对比

Fig.5 Voltage profile before and after optimization

由图5可知,加分布式电源以及无功优化后电压幅值明显升高,而且没有不符合电压约束条件的节点,即无功补偿后电压质量明显提高。

由图6可得,改进的禁忌搜索算法具有较好的

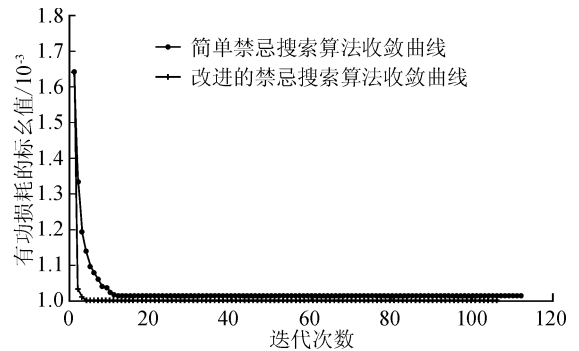


图6 不同算法的收敛曲线

Fig.6 Convergence curve of different algorithms

收敛性,即自适应长度的集中性和多样性禁忌搜索算法增强了收敛速度,减少了搜索迭代次数。该改进算法克服了简单禁忌搜索算法收敛速度慢和对初始解依赖性强的不足,扩大了寻优范围,加强了对优良解集进一步邻区的搜索效果。

5 结论

1)基于概率思想确定了风电机组的功率输出,将风电机组的运行分为三个典型场景,并在欠额定场景下讨论了三个状态,并相应进行了无功优化。风电机组的功率确定方法对含分布式电源的配电网运行具有一定的参考价值。

2)考虑了以网损最小为目标函数,节点电压不越线为约束条件,采用自适应长度的集中性和多样性禁忌搜索算法对含风电机组的配电网进行了无功优化。有效降低了禁忌搜索算法对初始解的依赖程度,提高了其收敛性和快速性。并用算例验证了该算法的实用性和可行性。

参考文献:

- [1] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(7):40-45.
Chen Haiyan, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. Reactive power optimization in distribution system with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 40-45.
- [2] 胡敏,周任军,胡军,等. 考虑风电机组模型的电力系统无功优化:中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集[C]. 北京,2008.
Hu Ming, Zhou Renjun, Hu Jun, et al. Reactive power optimization considering the model of wind turbine power system: China electric power system of higher education and its automation professional twenty-fourth annual meeting proceedings[C]. BeiJing,2008.
- [3] 魏希文,邱晓燕,李兴源,等. 含风电场的电网多目标无

- 功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 107-111.
- Wei Xiwen, Qiu Xiaoyan, Li Xingyuan, et al. Multi-objective reactive power optimization in power system with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 107-111.
- [4] 刘学平, 刘天琪, 李兴源. 含风电机组的配电网无功优化补偿[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 130-135.
- Liu Xueping, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Optimal reactive power planning in distribution system with wind power generators[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 130-135.
- [5] 陈琳, 钟金, 倪以信, 等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 20-24.
- Chen Lin, Zhong Jin, Ni Yixin, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation [J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(14): 20-24.
- [6] Haghifam M R, Omidvar M. Wind farm modeling in reliability assessment of power system; proceedings of the 9th international conference on probabilistic methods applied to power systems[C]. Kungliga Tekniska Hogskolan, 2006: 1-5.
- [7] 杨燕, 文福拴, 李力, 等. 计及风险控制策略的电力系统可用输电容量决策[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 50-55.
- Yang Yan, Wen Fushuan, Li Li, et al. Available transfer capability decision making with risk control strategies[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(4): 50-55.
- [8] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 1-7.
- Zhang Jietan, Cheng Haozhong, Yao Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1-7.
- [9] 邹斌, 李冬. 基于有效容量分布的含风电场电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 23-31.
- Zou Bin, Li Dong. Power system probabilistic production simulation with wind generation based on available capacity distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 23-31.
- [10] Huang Lingling, Fu Yang. Optimization of electrical connection scheme for large offshore wind farm with genetic algorithm; sustainable power generation and supply [C]. Shanghai, 2009: 1-4.
- [11] Vallee F, Lobry J. Impact of the wind geographical correlation level for reliability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2232-2239.
- [12] Liu Shukui, Tang Jing, Li Qi, et al. Reactive power optimization in power system based on adaptive focusing particle swarm optimization; international conference on electrical and control engineering[C]. Chengdu, 2010: 4003-4006.
- [13] 李丹, 陈皓勇. 分布式电源混合并网的配电网潮流算法研究[J]. 华东电力, 2011, 39(1): 76-80.
- Li Dan, Chen Haoyong. Algorithm research of load flow of distribution network with different distributed generations [J]. East China Electric Power, 2011, 39(1): 76-80.
- [14] 朱颢东, 李红婵. 基于双禁忌对象的并行禁忌搜索算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(29): 31-33.
- Zhu Haodong, Li Hongchan. Parallel tabu search algorithm based on double tabu objects [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(29): 31-33.
- [15] Liu Guangyuan, He Yi, Fang Yonghui, et al. A novel adaptive search strategy of intensification and diversification in tabu search; proceedings of 2003 IEEE international conference on neural networks & signal processing, proceedings [C]. Chongqing: China, 2003: 428-431.
- [16] 贺一. 禁忌搜索及其并行化研究[D]. 西南大学: 重庆, 2006.
- He Yi. Research on tabu search with its parallelization [D]. South West University: Chongqing, 2006.
- [17] Venkatesh B, Chandramohan S, Kayalvizhi N, et al. Optimal reconfiguration of radial distribution system using artificial intelligence methods; IEEE, ryerson univercity[C]. Canada, 2009: 660-665.

(责任编辑 李虹燕)