

含风电场的电网多目标无功优化

魏希文, 邱晓燕, 李兴源, 张子健

(四川大学电气信息学院, 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 随着智能电网建设提上日程, 各种分布式电源的并网技术也亟需发展, 其中就包括风电场的并网技术, 研究了含风电场的电网无功优化问题。考虑风速随机变化的特点, 采用无功-电压潮流计算模型, 并建立了以系统网损、电压平均偏离和静态电压稳定裕度为目标函数的多目标无功优化模型。改进了传统的遗传算法, 有效地避免了早熟和局部收敛, 并在适应度函数中引入了内点法的对数障碍函数, 有效改善了传统无功优化结果中某些节点电压容易接近上限的问题。算例表明该方法对含风电场的 IEEE57 节点系统具有良好的适用性。

关键词: 智能电网; 风电场; 无功优化; 遗传算法; 对数障碍函数

Multi-objective reactive power optimization in power system with wind farm

WEI Xi-wen, QIU Xiao-yan, LI Xing-yuan, ZHANG Zi-jian

(Provincial-Level Key Laboratory of Smart Grid, School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the acceleration of smart grid construction, distributed generation (DG) integration technology needs to be developed urgently. Reactive power optimization including wind-farm is studied, and the variability and intermittency of wind speed are considered. The multi-objective reactive power optimization model including network loss, average deviation of voltage and stability margin of static voltage is established. The traditional genetic arithmetic is improved, and logarithmic barrier function in interior point method is introduced into the fitness function. So premature and partial convergence are avoided and the problem that some voltage values easily approach the upper limit in the traditional reactive power optimization is solved. The effectiveness of the proposed method is demonstrated on IEEE-57 bus system with wind farm.

Key words: smart grid; wind farm; reactive power optimization; genetic algorithm; logarithmic barrier function

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0107-05

0 引言

近年来, 随着电力市场化进程不断加快, 用户对电能质量与用电可靠性要求不断提高, 再加上能源短缺问题凸显, “智能电网”的概念应运而生。2009年上半年, 国家电网公司首次向社会公布了“智能电网”发展计划, 根据该计划, 智能电网发展在我国将分为三个阶段逐步推进, 到2020年, 可全面建成统一的“坚强智能电网”。智能电网具有安全、高效、清洁、能自愈、信息化等特点, 使建设智能电网成为全球电力系统的发展趋势^[1]。另外, 与传统电网相比, 智能电网具有更强大的兼容性, 便于

风电等分布式电源并网发电。本文主要研究分布式电源中发展较为成熟的风电机组并网后电网的无功优化问题。

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影响很大, 使配网中不确定因素增多。相比负荷, 风速的变化更加频繁。因此为了研究方便, 突出风电对大电网的影响, 本文仅考虑风电机组输出功率变化对电网的影响。

文献[2]给出了风电机组输出功率随风速变化的几种数学模型。文献[3]针对传统无功优化部分节点电压易接近上限的情况, 在遗传算法的适应度函数中引入内点法的对数障碍函数, 保证优化后的节点电压处于较理想的水平。文献[4]给出了异步风力发电机的数学模型。文献[5]在简化的异步发电机稳

基金项目: 教育部博士点基金(20070610109); 国家科技攻关计划(JS20080113506594)

态等效电路的基础上,提出了计算含风电场的电力系统潮流的联合迭代方法。文献[6-7]在传统电网的无功优化中,以系统网损、电压平均偏离和静态电压稳定裕度为目标函数,并改进了传统的遗传算法。

本文选用了输出功率与风速的三次方成正比关系的数学模型,考虑风机输出功率受风速影响,将风机的无功功率表示为电压和有功的函数进行潮流计算。并采用改进遗传内点算法对含风电场的智能电网进行无功优化。文章最后在 IEEE57 节点系统中接入风电场,验证了本文方法的正确性和实用性。

1 风电机组的数学描述

目前大型风电机组常采用异步发电机形式,异步发电机结构简单,并网方便,但由于其本身没有励磁装置,因而启动时需要从电网或电容器吸收无功,从而影响电网无功分布和电压稳定。另外,风电机组的输出功率受风速影响,需要采用合理的风电机组输出功率模型。

1.1 异步风力发电机的数学模型

本文采用的异步风力发电机等效电路如图 1 所示。 V 为机端电压, x_m 为励磁电抗, x_1 为定子电抗, r_2 为转子电阻, x_2 为转子漏抗, s 为滑差,忽略定子电阻和铁心损耗,得到简化的异步发电机 G 型等效电路。

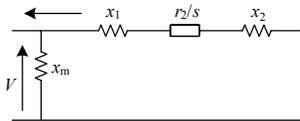


图 1 异步发电机等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of induction generator

由图 1 所示的电路关系可得,异步发电机的有功 P_c 、滑差 s 和无功功率 Q_c 分别为:

$$P_c = \frac{-V^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2} \quad (1)$$

$$s = -\frac{V^2 r_2 - \sqrt{V^4 r_2^2 - 4P_c x_k^2 r_2^2}}{2P_c x_k^2} \quad (2)$$

$$Q_c = \frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_c \quad (3)$$

式中: $x_k = x_1 + x_2$; P_c 即为风电机组的有功输出,若已知风速,则 P_c 可以由式 (1) 算得,进而可由式 (2)、(3) 得到无功功率关于电压的表达式。

1.2 风力发电机组的输出功率模型^[8]

风电机组输出功率近似与风速成正比,其分段函数表达式为:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & (v \leq v_{ci}) U (v \geq v_{co}) \\ \frac{P_R}{v_R^3 - v_{ci}^3} (v^3 - v_{ci}^3), & v_{ci} \leq v \leq v_R \\ P_R, & v \geq v_R \end{cases} \quad (4)$$

式中: v 为风电机组轮毂处的风速; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速; v_R 为额定风速; P_R 为额定输出功率。式 (4) 表示了风机的三种运行状态: 停机、欠额定运行和额定运行。

因此,忽略尾流效应,在不同风速下可以得出每台风力发电机组的有功输出,则整个风电场的有功输出为各台风机输出的总和。

1.3 包含风力发电机组的潮流计算方法

综上所述,当风电机组输出的有功功率一定时,其无功功率还与机端电压有关, Q 不能事先确定。因此在潮流计算中不能将风电机组视为简单的 PQ 节点。

对应风电场节点 i 的功率方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = \sum_{k=1}^M P_{ik} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = \sum_{k=1}^M Q_{ik} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: M 为风电场中并联运行的异步发电机台数; P_{ik} 和 Q_{ik} 为第 k 台机组的有功和无功输出,其中 P_{ik} 由研究周期中各个时段内的风电场平均风速决定。

综合以上分析,在含风电场的系统中,用牛顿法进行潮流计算时只需要修改雅可比矩阵中的对应元素 $V_i(\partial \Delta Q_i / \partial V_i)$,其他元素的表达式及计算步骤与不含风电场的潮流计算别无二致^[9-10]。

2 含风电场的多目标无功优化

2.1 目标函数

本文的无功优化模型在考虑系统网损、静态电压稳定裕度的基础上,还考虑引入了电压平均偏离指标。针对多目标无功优化问题,先将 3 个目标函数进行归一化处理再加权。

1) 系统网损

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_k} G_{k(i,j)} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (6)$$

式中: N_k 为系统支路数; $G_{k(i,j)}$ 为支路的电导; V_i 、 V_j 、 θ_i 、 θ_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值和相角。

2) 静态电压稳定裕度 δ 为潮流雅可比矩阵 J 的最小奇异值,由于 δ 反映了 J 接近奇异的程度,因此可用 δ 作为电力系统的静态电压稳定裕度指标,它表示当前运行点和静态电压稳定极限之间的

距离^[11]。

3) 电压平均偏离

$$V_{ad} = \left(\sum_{i=1}^n |V_{Ni} - V_i| \right) / n \quad (7)$$

式中: V_i 为节点的实际电压; V_{Ni} 为节点的额定电压。

通过对权系数的合理选择, 以及对以上三个指标进行归一化处理, 得到最终的目标函数为:

$$F = \lambda_1 P_{loss}^* + \lambda_2 V_{ad}^* + \lambda_3 \delta^* \quad (8)$$

式中:

$$P_{loss}^* = (P_{loss} - P_{loss\min}) / (P_{loss\max} - P_{loss\min}) \quad (9)$$

$$V_{ad}^* = (V_{ad} - V_{ad\min}) / (V_{ad\max} - V_{ad\min}) \quad (10)$$

$$\delta^* = (\delta_{\max} - \delta) / (\delta_{\max} - \delta_{\min}) \quad (11)$$

2.2 约束条件

等式约束条件即为潮流方程。不等式约束条件为:

$$\begin{cases} Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \\ V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Q 为发电机无功出力的大小, 包括风机和一般发电机; V 为节点电压; T 为变压器变比; C 为并联电容器投切容量。

3 基于改进遗传内点算法的含风电场的电网无功优化

3.1 改进遗传算法

传统遗传算法是随机产生初始种群, 并用轮盘赌选择策略确定个体的适应度, 并判断是否符合优化准则。这样做难以实现全局最优, 并容易引起早熟收敛。本文首先将解空间划分为 M 个子空间, 在每个子空间均匀选择 N 个染色体。从这 $M * N$ 个染色体中, 选择适应度最大的个体作为初始群体, 再用小生境算法进行选择, 过滤种群中的相似个体, 最后采用移民机制, 将最差个体淘汰, 用产生的新个体代替。这样有利于找到全局最优解, 并避免早熟收敛^[12]。

3.2 基于改进遗传内点算法的无功优化

1) 控制变量的编码

遗传算法中需要对控制变量进行编码^[13]。无功优化中的控制量包括无功补偿装置的投切、变压器分接头的调整和发电机无功出力的调节等。变压器分接头的调整和无功补偿装置的投切都是离散控制的变量, 发电机无功出力是可以连续调整的变量。因此这里对控制变量采用整数和实数混合编码^[14]。

$$X = [C_1, C_2, \dots, C_m | T_1, T_2, \dots, T_n | Q_1, Q_2, \dots, Q_s] \quad (13)$$

其中变压器 T 和电容器 C 采用整数编码, 发电机无功功率 Q 采用实数编码。

2) 适应度函数的选择^[9]

无功优化的结果中, 经常会出现某些节点电压尽管没有越限, 但非常接近于上限的情况, 这种电压偏高的情况会加快设备的老化, 对设备安全运行不利。为避免这种情况, 本文借鉴内点法中, 在目标函数中加入松弛变量, 使所求的适应度函数成为原目标函数与对数障碍函数的组合。即

$$F' = F - \mu \sum_{j=1}^r (\ln u_r + \ln l_r) \quad (14)$$

式中, μ 为障碍常数或扰动因子 (大于 0), 松弛变量 u 和 l 分别为 r 维的列向量。

3.3 算法流程

基于改进遗传内点算法的含风电场的电力系统无功优化流程如图 2 所示。

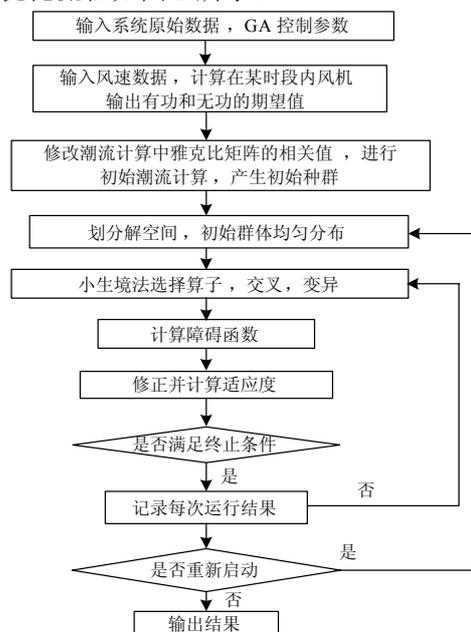


图 2 无功优化算法流程图

Fig.2 Flow chart of reactive power optimization

4 算例分析

本文以 IEEE57 节点系统为算例进行优化计算。现在第 53 节点处接入一台风电机组, 其额定容量为 600 kW, 机端额定电压为 690 V。风电机组的切入风速、额定风速和切出风速分别为 3 m/s、13.5 m/s、25 m/s。表 1 为所采用风电机组的技术参数。

本文数据以 100 MVA 为基值。以下所有数据均已转化为标么值。以节点 1 作为潮流计算中的平衡节点, 目标函数中权系数的值见表 2。遗传计算中

种群规模取 25，最大迭代次数为 500。

表 1 风电机组的技术参数

Tab.1 Technical parameters of wind generator

参数	x_1 / Ω	x_2 / Ω	r_2 / Ω	x_m / Ω
数值	0.076 2	0.232 89	0.007 59	3.447 97

表 2 权系数取值

Tab.2 Weighing coefficient

系统	λ_1	λ_2	λ_3
IEEE57	0.427	0.116	0.043

表 3 为风机分别运行在停机、欠额定运行、额定运行三种状态下时，系统无功优化的结果。

表 3 含风电场的系统计算结果

Tab.3 The optimized results of IEEE57 buses system with wind generator

状态	风速/ (m/s)	F	P_{loss}	V_{ad}	δ
停机	<3 或 >25	0.048 2	0.227 9	0.025 1	0.171 9
	4	0.046 8	0.227 4	0.023 9	0.171 9
欠 额 定	6	0.046 3	0.227 3	0.023 1	0.172 0
	8	0.046 2	0.226 7	0.022 8	0.172 8
	10	0.045 6	0.226 5	0.022 7	0.172 2
	12	0.045 3	0.226 0	0.022 6	0.172 7
额定	13.5~25	0.044 9	0.225 9	0.022 0	0.173 5

由表 3 可以看出，风机并网运行时（即风机欠额定或额定运行时），系统的有功网损 P_{loss} 减小。这是由于风电场发出有功，提供给附近的负荷节点，减少了系统中的有功流动，因此减少了有功网损。另外，与风机接入前（即停机状态下）相比，随着风机有功出力的增加，电压偏差 V_{ad} 减小，静态电压稳定裕度 δ 增大，说明无功优化后，风机的接入使得系统电压水平更好，也更稳定。

取风机额定运行状态下，优化前后的结果比较如表 4 所示。

表 4 表明，优化后不仅网损有了显著的改善，电压越限个数也由 2 变为 0。

以风机在额定状态运行时的目标函数收敛曲线为例，由图 3 可以看出，改进后的遗传算法有效避免了早熟，最终在 420 代左右时收敛到全局最优解，而简单遗传算法在 200 代左右时就已经陷入了局部最优。

表 4 优化前后结果比较

Tab.4 Result before and after the optimization

	F	P_{loss}	V_{ad}	δ	电压越限个数
优化前	0.082 7	0.299 5	0.026 4	0.171 9	2
优化后	0.044 9	0.225 9	0.022 0	0.173 5	0

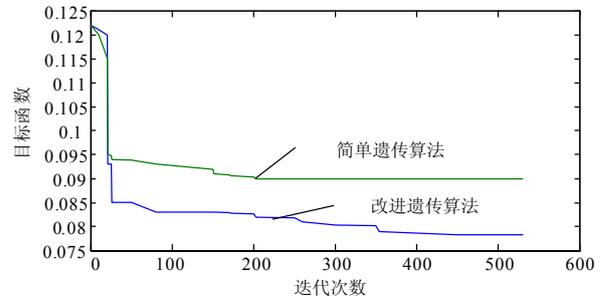


图 3 风机在额定运行状态下的目标函数曲线

Fig.3 Convergence curves of target function of wind generator at rated operating

5 结论

1) 考虑了风电机组滑差和机端电压对输出无功功率大小的影响，将风机的无功功率表示为电压和有功的函数，在潮流计算的过程中，只需要改动雅可比矩阵中的对应元素，减少了计算量。

2) 采用改进的遗传算法，有效避免了早熟，引入了对数障碍函数，解决了节点电压易接近上限的问题。算例表明，本文采用的方法不仅对传统电网（风机停机状态下）具有良好的适应性，对含风电场的智能电网无功优化也取得了良好的效果。

参考文献

- [1] 李兴源, 魏巍, 王瑜红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (17): 1-7. LI Xing-yuan, WEI Wei, WANG Yu-hong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (17): 1-7.
- [2] 李新, 彭怡, 赵晶晶, 等. 分布式电源并网的潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (17): 78-87. LI Xin, PENG Yi, ZHAO Jing-jing, et al. Power flow calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (17): 78-87.
- [3] 邱晓燕, 张子健, 李兴源. 基于改进遗传内点算法的电网多目标无功优化[J]. 电网技术, 2009, 33 (13): 27-31. QIU Xiao-yan, ZHANG Zi-jian, LI Xing-yuan. Multi-objective reactive power optimization based on

- improved genetic-interior point algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33 (13): 27-31.
- [4] Feijoo A E, Cidras J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 15 (1): 110-115.
- [5] 王海超, 周双喜, 鲁宗相, 等. 含风电场的电力系统潮流计算的联合迭代方法及应用[J]. 电网技术, 2005, 29 (18): 59-62.
WANG Hai-chao, ZHOU Shuang-xi, LU Zong-xiang, et al. A joint iteration method for load flow calculation of power system containing unified wind farm and its application[J]. Power System Technology, 2005, 29 (18): 59-62.
- [6] 张子健, 邱晓燕. 基于多目标决策的电力系统无功优化[J]. 贵州工业大学学报, 2008, 37 (5): 80-82.
ZHANG Zi-jian, QIU Xiao-yan. Multi-objective decision on reactive power optimization[J]. Journal of Guizhou University of Technology, 2008, 37 (5): 80-82.
- [7] 王云, 张伏生, 陈建斌, 等. 电力系统多目标无功优化研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 213-217.
WANG Yun, ZHANG Fu-sheng, CHEN Jian-bin, et al. Multi-objective reactive power optimization in power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (2): 213-217.
- [8] 张硕, 李庚银, 周明, 等. 风电场可靠性建模[J]. 电网技术, 2009, 33 (13): 37-41.
ZHANG Shuo, LI Geng-yin, ZHOU Ming, et al. Reliability modeling of large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33 (13): 37-41.
- [9] 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 Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Reactive power optimization in distribution system with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (7): 40-45.
- [10] 王守相, 江兴月, 王成山. 含风力发电机组的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2006, 30 (21): 42-45.
WANG Shou-xiang, JIANG Xing-yue, WANG Cheng-shan. Power flow analysis of distribution network containing wind power generators[J]. Power System Technology, 2006, 30 (21): 42-45.
- [11] 刘天琪, 邱晓燕, 李华强. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 253-255.
- [12] Bakirtzis A G, Biskas P N, Zoumas C E, et al. Optimal power flow by enhanced genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (2): 229-236.
- [13] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 于歆杰, 周根贵, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] 蒲红军, 张明军. 基于混合编码改进遗传算法的无功优化[J]. 继电器, 2006, 34 (23): 20-28.
PU Hong-jun, ZHANG Ming-jun. Reactive power optimization using an improved genetic algorithm based on hybrid-code[J]. Relay, 2006, 34 (23): 20-28.

收稿日期: 2009-09-22; 修回日期: 2009-11-05

作者简介:

魏希文 (1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析计算及稳定控制、智能电网; E-mail: wxwxw000@yahoo.cn

邱晓燕 (1964-), 女, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制。

(上接第 106 页 continued from page 106)

- [11] 唐小我, 马永开, 曾勇, 等. 现代组合预测和组合投资决策方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] 王平, 张亮, 陈星莺. 基于模糊聚类与RBF网络的短期负荷预测[J]. 继电器, 2006, 34 (10): 64-67.
WANG Ping, ZHANG Liang, CHEN Xing-ying. Short-term load forecasting based on fuzzy cluster and RBF network[J]. Relay, 2006, 34 (10): 64-67.
- [13] 陈根永, 史敬天, 毛晓波. 考虑温度积累效应的短期电力负荷预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (16): 24-28.
CHEN Gen-yong, SHI Jing-tian, MAO Xiao-bo. Study on the method of short-term load forecasting considering the accumulation effect of temperature[J]. Power System

Protection and Control, 2009, 37 (16): 24-28.

[14] <http://neuron.tuke.sk/competition/index.php>

[15] 康重庆, 夏清, 刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

收稿日期, 2009-09-17; 修回日期, 2009-11-05

作者简介,

徐建 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定及无功优化计算; E-mail: xujiantop@163.com

邱晓燕 (1964-), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制;

张子健 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无功优化及负荷预测。