

Reactive Power Optimization Model for Distribution Networks with Renewable Energy Based on Primal-Dual Interior Point Algorithm

Weizhong Zeng¹, Jiekang Wu², Yanan Wang², Qingyuan Guo¹

¹Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Dongguan Guangdong

²School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

Email: zwz9339@163.com, wujiekang@163.com

Received: Dec. 3rd, 2017; accepted: Dec. 19th, 2017; published: Dec. 26th, 2017

Abstract

The uncertainty of the distributed power supply's output has a major impact on the voltage fluctuation of power system, the power flow distribution and the power quality. Considering the problems such as the voltage fluctuation of distribution network and the over limit, for the purpose of regulating the voltage, improving the power quality and decreasing the system loss, a new method named second-order cone programming method proposed in this article can solve the reactive power optimization problem based on complex nonlinear programming problem in distribution network which includes the distributed power supply. Firstly, the new method which takes the voltage deviation of each node in power system and the distributed power supply's output limit as constraints and takes the access location and the access capacity as decision variable establishes power system SOCP model aimed at minimizing the loss of power system. Then the article solves the problem using Modern primal dual interior point algorithm. The validity and feasibility of the proposed model and method are verified by the calculation results of IEEE14 system. It also shows that the method has high computational efficiency and feasibility.

Keywords

New Energy Distribution Networks, Reactive Power Optimization, Distributed Generation, Second-Order Cone Programming, Primal-Dual Interior Point Algorithm

基于原对偶内点法的新能源配电网无功优化模型

曾伟忠¹, 吴杰康², 王亚楠², 郭清元¹

文章引用: 曾伟忠, 吴杰康, 王亚楠, 郭清元. 基于原对偶内点法的新能源配电网无功优化模型[J]. 智能电网, 2017, 7(6): 479-486. DOI: 10.12677/sg.2017.76053

¹广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞

²广东工业大学自动化学院, 广东 广州

Email: zwz9339@163.com, wujiekang@163.com

收稿日期: 2017年12月3日; 录用日期: 2017年12月19日; 发布日期: 2017年12月26日

摘要

分布式电源出力的随机性与波动性使得配电网系统的潮流分布和电能质量等方面受到了重大影响。考虑到配电网电压波动等问题, 在复杂的非线性规划问题的基础上, 提出一种解决含分布式电源配电网无功优化问题的二阶锥规划方法, 以达到调节电压水平、提高电能质量和降低系统损耗的目的。该方法首先将电力系统各节点电压偏差、电源有功和无功出力的上下界作为约束条件, 以分布式电源的接入位置和接入容量作为决策变量, 建立以电力系统损耗期望值最小为目标的SOCP模型, 并采用现代原对偶内点算法加以求解。通过IEEE14节点系统的计算结果, 验证了所提模型与方法的有效性和可行性。

关键词

新能源配电网, 无功优化, 分布式电源, 二阶锥规划, 原对偶内点法

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了缓解能源危机, 分布式电源(Distributed Generation, DG)日益成为各国专家学者研究的重点[1], 传统供电形式无论在经济或效率等方面都无法满足现在高环保高质量的生活方式, DG的接入给电力系统带来节能、稳定以及安全的电能质量的同时也带来很多问题[2]。随着大量不确定DG接入配电网, 会引发配电网电压越限、潮流分布不均衡以及电能质量不达标等多种电力系统稳定问题, 这使得优化配电网显得尤为重要, 其中一个问题为优化电压稳定, 优化配电网电压稳定其本质上是一个同时包含连续、离散决策变量的最优无功协调问题[3]。

多样化随机DG的接入会引发配电网电压越限、潮流分布不均衡以及电能质量不达标等多种电力系统稳定问题[4], 使得配电系统的控制和管理变得更加复杂和困难。其中一个问题是在配电网中各节点电压维持不越界的范围内, 如何调配DG接入配电网的有功功率和无功功率使得电网系统网损降到最低[5][6]。这个问题是多目标协调的非线性优化问题, 在确定目标函数的基础上, 同时兼顾电网系统潮流平衡方程以及电压及相角不越限的范围不等式[7][8]。

内点法是目前解决优化问题的先进方法[9][10][11], 它是在解决线性规划问题的常规算法单纯形法的基础上提出的一种更复杂、更快速、更精确的计算线性规划问题的方法。文献[12]从DG接入配电网容量限制方面, 提出了在DG最大接入量不能超过负荷25%的前提下, 通过计算各节点对网损的敏感度分析配电网DG规划。文献[13]针对多类型的DG接入配电网, 对配电网进行重构, 使配电网到达无功最优。

针对上述问题, 本文在原对偶内点法的基础上对间歇性分布式电源接入配电网进行合理优化, 在

IEEE14 节点基础上进行实例分析, 通过比较, 证明了原对偶内点法在协调网络损耗、电压平稳和电能质量提高等方面具有较好的效果。

2. 原对偶内点算法

原对偶内点算法[14]是在解决线性规划问题的常规算法基础上提出的一种更复杂、更快速、更精确的计算线性规划问题的方法。该算法从对于扰动问题严格可行并足够靠近其中心路径的迭代点出发, 经过一次参数更新和一次主迭代使残量和对偶间隙更趋近于零, 最终使迭代点趋近于最优解。

2.1. 原始对偶内点法基本原理

对偶问题数学模型可以描述如下:

$$\begin{aligned} \min & f(x) \\ \text{s.t.} & h(x) = 0 \\ & g_{\min} < g(x) < g_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $f(x)$ 、 $h(x)$ 、 $g(x)$ 分别为目标函数、等式约束条件和不等式约束条件。

引入松弛变量 l 、 u , 不等式约束条件为:

$$\begin{cases} g - l - g_{\min} = 0 \\ g_{\max} - u - g = 0 \\ l > 0, u < 0 \end{cases} \quad (2)$$

目标函数中引入拉格朗日因子 y 、 z 、 w 及障碍常数 m , 目标函数变为障碍函数:

$$\begin{aligned} F = & f(x) + y^T h(x) + z^T [g(x) - l - g_{\min}] \\ & + w^T [g(x) + u - g_{\max}] - u \left(\sum_{i=1}^r \ln l_i + \sum_{i=1}^r \ln u_i \right) \end{aligned} \quad (3)$$

2.2. 迭代步长的确定

在状态变量和控制变量满足可行性的基础上, 步长尽可能大, 使其快速逼近可行域内最优解。

$$\begin{aligned} \alpha_p &= 0.9995 \min \left[\min \left(\frac{-l_i}{\Delta l_i}, \Delta l_i < 0; \frac{-u_i}{\Delta u_i}, \Delta u_i < 0 \right), 1 \right] \\ \alpha_q &= 0.9995 \min \left[\min \left(\frac{-z_i}{\Delta z_i}, \Delta z_i < 0; \frac{-w_i}{\Delta w_i}, \Delta w_i < 0 \right), 1 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, α_p 、 α_q 分别为原变量和对偶变量的迭代步长。

2.3. 障碍常数的确定

障碍常数的选取对收敛性能是至关重要的, 障碍常数与对偶间隙成正比关系, 在系统优化迭代过程中, 对偶间隙不断减少, 当对偶间隙等于零时, 原始问题和对偶问题达到最优解, 非线性规划中常用补偿间隙近似代替对偶间隙, 补偿间隙为:

$$Gap = \sum_{i=1}^r (u_i w_i - l_i z_i) \quad (5)$$

式中, 障碍常数通常设为 $\mu = \sigma \times Gap / (2r)$; σ 为中心数通常取值为 0.01~0.2; r 为不等式约束个数。

3. 配电网无功优化的锥规划模型

本文以系统网损最小为优化目标，选用控制变量为 DG 无功出力，状态变量为节点电压幅值和相角，以潮流方程为等式约束条件，以 DG 出力限制、节点电压不越限等为不等式约束条件，在满足约束条件的情况下运用原始对偶内点法计算无功优化问题。

3.1. 锥规划

线性规划及其对偶问题数学模型描述如下：

$$\min \{c^T x : Ax = b, x \geq 0\} \tag{6}$$

与式(2-1)相对应的对偶问题描述如式(2-2)：

$$\max \{b^T y : A^T y + s = c, s \geq 0\} \tag{7}$$

对于式(2-1)和式(2-2)描述的线性规划问题，其约束条件为：

$$\begin{cases} Ax = b & x \geq 0 \\ A^T y + s = c & s \geq 0 \\ xs = 0 \end{cases} \tag{8}$$

出现扰动情况下的线性规划问题及其对偶问题描述如下：

$$\min \{(c - vr_c^0)^T x : Ax = b - vr_b^0, x \geq 0\} \tag{9}$$

$$\max \{(b - vr_b^0)^T x : A^T y^0 + s = c - vr_c^0, s \geq 0\} \tag{10}$$

式中，初始点为 (x^0, y^0, s^0) ， r_b^0 、 r_c^0 为可行性残量； $r_b^0 = b - Ax^0$ ， $r_c^0 = c - A^T y^0 - s^0$ ， $v \in (0,1)$ 。

此时的约束条件方程变为如下描述：

$$\begin{cases} b - Ax = vr_b^0 & x \geq 0 \\ c - A^T y - s = vr_c^0 & s \geq 0 \\ xs = ue \end{cases} \tag{11}$$

3.2. 无功优化数学模型

本文以网损最小为优化目标构建如下无功优化数学模型：

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \\ P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Ci} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) &= 0 \\ V_{\min} &< V_i < V_{\max} \\ Q_{Gi \min} &< Q_{Gi} < Q_{Gi \max} \end{aligned} \tag{12}$$

式中， G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵的元素 Y_{ij} 的实部和虚部； P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为节点的负荷有功和无功功率； P_{Gi} 和 Q_{Gi} 为分布式电源的有功和无功出力； V_i 为节点 i 的电压幅值； θ_{ij} 为节点 i 的电压相角；

3.3. 等式约束的雅可比矩阵

原始变量和对偶变量的修正量求解需正确写出等式约束的雅可比矩阵，不等式约束的雅可比矩阵和海森矩阵。等式约束的雅可比矩阵为等式对变量的偏导，即：

$$J_g(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_p}{\partial P_G} & \frac{\partial g_p}{\partial Q_R} & \frac{\partial g_p}{\partial V} & \frac{\partial g_p}{\partial \theta} \\ \frac{\partial g_Q}{\partial P_G} & \frac{\partial g_Q}{\partial Q_R} & \frac{\partial g_Q}{\partial V} & \frac{\partial g_Q}{\partial \theta} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$= \begin{pmatrix} E_{g_p} & 0 & N & H \\ 0 & E_{g_Q} & L & K \end{pmatrix}$$

式中， E_{g_p} 、 E_{g_Q} 为系统潮流有功等式对 DG 有功出力的偏导和无功等式对系统无功补偿容量的偏导， N 、 H 、 L 、 K 分别为潮流有功等式对电压幅值、相角偏导以及无功等式对电压幅值和相角偏导，其中 H 、 L 、 K 可由 N 为例同理推导得出。

$$E_{g_p}(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_{p1}}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial g_{p1}}{\partial P_{G2}} & \dots & \frac{\partial g_{p1}}{\partial P_{Gg}} \\ \frac{\partial g_{p2}}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial g_{p2}}{\partial P_{G2}} & \dots & \frac{\partial g_{p2}}{\partial P_{Gg}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_{pn}}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial g_{pn}}{\partial P_{G2}} & \dots & \frac{\partial g_{pn}}{\partial P_{Gg}} \end{pmatrix}_{n \times g} \quad (14)$$

$$E_{g_Q}(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_{Q1}}{\partial Q_{R1}} & \frac{\partial g_{Q1}}{\partial Q_{R2}} & \dots & \frac{\partial g_{Q1}}{\partial Q_{Rr}} \\ \frac{\partial g_{Q2}}{\partial Q_{R1}} & \frac{\partial g_{Q2}}{\partial Q_{R2}} & \dots & \frac{\partial g_{Q2}}{\partial Q_{Rr}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_{Qn}}{\partial Q_{R1}} & \frac{\partial g_{Qn}}{\partial Q_{R2}} & \dots & \frac{\partial g_{Qn}}{\partial Q_{Rr}} \end{pmatrix}_{n \times r} \quad (15)$$

$$N = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_{p1}}{\partial V_1} & \frac{\partial g_{p1}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial g_{p1}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial g_{p2}}{\partial V_1} & \frac{\partial g_{p2}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial g_{p2}}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_{pn}}{\partial V_1} & \frac{\partial g_{pn}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial g_{pn}}{\partial V_n} \end{pmatrix}_{n \times n} \quad (16)$$

由等式约束条件得出的雅可比矩阵同理可得到不等式雅可比矩阵。

3.4. 不等式约束的海森矩阵

不等式约束的海森矩阵是由不等式对变量的二阶偏导得出，公式如下：

$$\nabla_x^2 h_i(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial^2 P_G} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial P_G \partial Q_R} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial P_G \partial V} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial P_G \partial \theta} \\ \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial Q_R \partial P_G} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial^2 Q_R} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial Q_R \partial V} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial Q_R \partial \theta} \\ \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial V \partial P_G} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial V \partial Q_R} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial^2 V} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial V \partial \theta} \\ \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial \theta \partial P_G} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial \theta \partial Q_R} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial \theta \partial V} & \frac{\partial^2 h_{P_i}}{\partial^2 \theta} \end{pmatrix} \quad (17)$$

3.5. 原对偶内点法无功优化算法步骤

内点法基本计算步骤为：

- 1) 设置初值(可行的初始点，惩罚因子初始值，缩减系数，收敛精度，设置初始迭代次数 $k = 0$)；
- 2) 构造惩罚函数，求解目标函数极值；
- 3) 判断所得函数极值是否满足收敛条件，若满足则迭代终止，若不满足则缩小惩罚因子，当前极值为下次迭代初始值，直至满足收敛条件。

求解步骤如图 1 所示。

4. 算例分析

以 IEEE14 节点配电系统为例，系统中基准电压为 10 kV，基准功率为 100 MVA，在节点 1.2.3.6.8 处接入发电机，无功补偿点为节点 9，以及支路 4-7，4-9，5-6 处接可调变压器。以 DG 接入网损最小化为目标函数，在各节点电压及发电机有功功率和无功功率不越限情况下，使网损达到最小化。14 节点配电系统如图 2 所示。

设置的松弛变量 $l = 0.8$ ， $u = 1.1$ ，拉格朗日因子 $z = 1$ ， $w = -1.5$ ， $y = 1$ ，计算得出各节点电压如表 1 所示。

由此可以得出优化后各节点电压变化范围较小，且经过计算得出优化前网络损耗为 0.1364 kW，内点法优化后损耗为 0.1128 kW，遗传算法优化后损耗为 0.7342 kW。

补偿间隙 Gap 随迭代次数的增加而减小，仿真结果如图 3 所示。

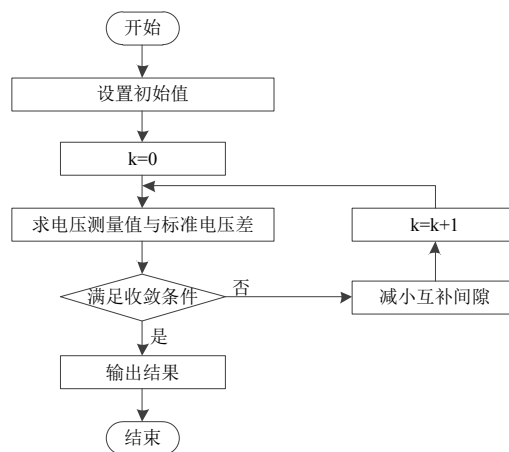


Figure 1. Solving steps
图 1. 求解步骤

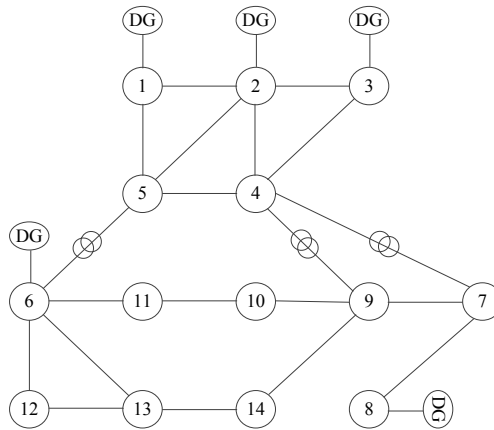


Figure 2. IEEE14 distribution system
图 2. IEEE14 配电系统

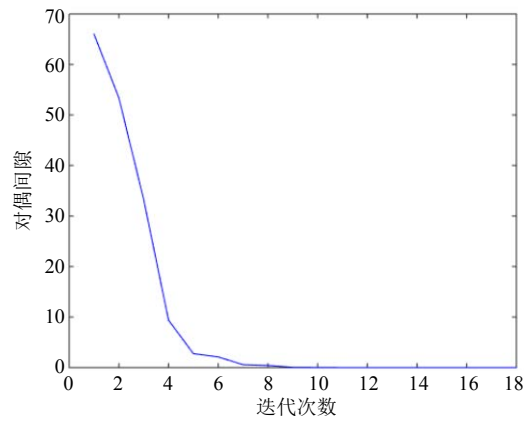


Figure 3. The compensation Gap varies with the number of iterations
图 3. 补偿间隙随迭代次数变化曲线

Table 1. Optimization results of system state variables
表 1. 系统状态变量优化结果

状态变量	初始值	内点算法	遗传算法
v_1	1.0600	1.0171	1.0600
v_2	1.0950	1.0013	1.0560
v_3	1.0100	1.0500	1.0532
v_4	1.0190	0.9969	1.0528
v_5	1.0358	0.9909	1.0493
v_6	1.0700	1.0060	1.0470
v_7	1.0600	1.0156	1.0452
v_8	1.0900	1.0500	1.0467
v_9	1.0628	0.9949	1.0466
v_{10}	1.0652	0.9891	1.0474
v_{11}	1.0386	0.9939	1.0480
v_{12}	1.0243	0.9922	1.0484
v_{13}	1.0443	0.9917	1.0431
v_{14}	1.0180	0.9744	1.000

5. 总结

DG 出力的不确定性造成电网系统电压不稳定以及损耗值增大等问题,合理的调节配电网无功可以有效减少系统有功损耗、增强系统电能稳定。通过接入 IEEE14 节点系统比,得出原对偶内点法是可行的且具有较高的计算速度和精确度。

基金项目

国家自然科学基金项目(50767001); 广东省公益研究与能力建设专项资金项目(2014A010106026); 中国南方电网有限责任公司科技项目(031900KK52150047)。

参考文献 (References)

- [1] 王伟. 含分布式电源的配电网潮流计算及网损分析的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [2] Sheng, W., Liu, K.Y., Liu, Y., *et al.* (2016) Reactive Power Coordinated Optimisation Method with Renewable Distributed Generation Based on Improved Harmony Search. *IET Generation Transmission & Distribution*, **10**, 3152-3162. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1051>
- [3] Billinton, R., Fotuhi-Firuzabad, M. and Chen, H. (1999) Probabilistic Performance Assessment of Wind Energy Conversion Systems. *Discussion*, **14**, 223.
- [4] Li, Q., Liu, M. and Liu, H. (2015) Piecewise Normalized Normal Constraint Method Applied to Minimization of Voltage Deviation and Active Power Loss in an AC-DC Hybrid Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, **30**, 1243-1251. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2343625>
- [5] 李文琦. 含分布式发电的配电网网损分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [6] Bouhouras, A.S., Sgouras, K.I., Gkaidatzis, P.A., *et al.* (2016) Optimal Active and Reactive Nodal Power Requirements towards Loss Minimization under Reverse Power Flow Constraint Defining DG Type. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **78**, 445-454. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.014>
- [7] 赵晋泉, 居俐洁, 戴则梅, 等. 基于分支定界—原对偶内点法的日前无功优化[J]. 电力系统自动化, 2015(15): 55-60.
- [8] Lei, M., Yang, W., Peng, X., *et al.* (2015) Reactive Power Optimization of the Distribution Network With Distributed Generation Based on Improved Simple PSO Algorithm. *Journal of North China Electric Power University*, **42**, 39-44.
- [9] 常鲜戎, 张亮平, 郑焕坤. 非线性原-对偶内点法无功优化中的修正方程降维方法[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 46-51.
- [10] 蒋平, 梁乐. 基于内点法和遗传算法相结合的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 724-729.
- [11] Zhou, H.Q., Guo, J.Z., Zhou, R.L., Gu, K.H. and Qian, L.M. (2016) Interior Point Method Based Reactive Power Optimization of Active Distribution Network. *China International Conference on Electricity Distribution*, Xi'an, 10-13 August 2016, 1123-1128.
- [12] 庄园, 王磊. 分布式电源在配电网中优化选址与定容的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012(20): 73-78.
- [13] Teshome, D.F. and Lian, K.L. (2016) A Smart Distribution System Reconfiguration Algorithm with Optimal Active Power Scheduling Considering Various Types of Distributed Generators. *IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering*, **11**, 564-576. <https://doi.org/10.1002/tee.22274>
- [14] 张立溥. 锥规划的全牛顿步不可行内点算法[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2011.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org