

含潮流路由器的配电网最优潮流计算

李成豪¹, 王 淳¹, 尹发根^{1,2}, 王 涛¹

(1. 南昌大学电气与自动化系, 江西 南昌 330031; 2. 宜春学院理工学院, 江西 宜春 336000)

摘要: 为解决配电网控制分散、控制元件可调范围小等问题, 将潮流路由器(Power Flow Router, PFR)应用于配电网。提出了一种适用于配电网的含潮流路由器的改进支路潮流模型, 并基于此建立了含 PFR 的配电网最优潮流模型。对模型进行二阶锥松弛, 并采用 Gurobi 等商用算法包对松弛后的模型进行求解。为考虑负荷和分布式电源输出的不确定性, 提出了一种拉丁超立方抽样和二阶锥规划相结合的概率最优潮流求解方法。采用修订的 IEEE33 节点系统验证了所提方法的有效性。

关键词: 配电网; 潮流路由器; 二阶锥松弛; 最优潮流; 拉丁超立方抽样

Optimal power flow calculation including power flow router in distribution network

LI Chenghao¹, WANG Chun¹, YIN Fagen^{1,2}, WANG Tao¹

(1. Department of Electrical and Automatic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. College of Physical Science and Technology Engineering, Yichun University, Yichun 336000, China)

Abstract: In order to solve the problem of limited control range of control elements and scattered control pattern of distribution networks, Power Flow Router (PFR) is applied in distribution networks. An improved branch flow model with power flow routers in distribution networks is proposed and an optimal power flow model including PFR is constructed. Second-order cone relaxation is used to relax the model and the relaxed model is solved by using the commercial algorithm package such as Gurobi. Furthermore, a method, which considers the uncertainty of load and distributed generation's output, is presented based on the combination of Latin hypercube sampling and second-order cone programming. The revised IEEE 33-bus system verifies the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467012).

Key words: distribution network; power flow router; second-order cone relaxation; optimal power flow; Latin hypercube sampling

0 引言

最优潮流是指当系统的结构参数和负荷情况都给定时, 调节可利用的控制变量寻求满足约束条件的, 并使系统的某一性能指标达到最优值的潮流分布。由于控制变量及约束条件的特性, 最优潮流问题本质上是一个非凸非线性规划问题。最优潮流的求解方法主要分为常规数学方法和智能算法两大类。常规数学方法包括简化梯度法^[1]、内点法^[2]等。智能算法包括进化算法^[3]、粒子群算法^[4]、遗传算法^[5]等。由于网络结构特性与参数的差异, 直流最优潮流^[6]等常用于输电网最优潮流模型的线性化方

法无法适用于配电网最优潮流模型。采用智能算法和数学方法对非凸非线性模型进行直接求解的配电网最优潮流计算方法均无法保证解的全局最优性。近年来, 为探寻更有效的求解配电网最优潮流的方法, 基于二阶锥松弛方法(Second Order Conic Relaxation, SOCR)求解最优潮流的算法得到了研究人员的青睐, 通过将模型中非凸非线性约束松弛为二阶锥约束, 将原问题转化为二阶锥规划问题, 通过求解松弛后的模型可获得全局最优解。文献[7-8]首次系统性地建立求解最优潮流的支路潮流模型, 并通过相角松弛和二阶锥松弛将原模型转化为二阶锥规划模型, 继而获得全局最优解, 并对纯负荷辐射网的松弛准确性进行了验证。文献[9]采用二阶锥松弛法与分段线性化, 考虑了 OLTC 等主动控制元

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51467012)

件,建立了基于二阶锥规划的含有载调压变压器的主动配电网最优潮流模型,并验证了主动管理元件接入后松弛的准确性。文献[10]通过对主动配电网中多种参与元素进行线性化处理,提出了一种基于二阶锥规划的配电网动态最优潮流模型框架,并分析了多种参与元素接入下松弛模型的准确性。文献[11]采用二阶锥松弛法对直流最优潮流模型进行松弛,并结合交替方向乘子法提出了一种直流配电网分布式最优潮流计算方法。

可再生能源的并网和需求侧响应等不确定性因素推动了概率最优潮流的发展。概率最优潮流的求解方法主要包括模拟法^[12]、近似法^[13]和转化法^[14]。近似法根据各阶矩方法不同可分为点估计法^[15]和无迹变换法^[16],近似法的过程简单,有较好的求解效率和收敛性,但精度较差且无法获得输出变量的精确分布。转化法可直接求解含整数变量的优化问题,但收敛性和鲁棒性较差。模拟法利用采样方法生成输出变量的样本,进行重复的确定性优化从而获得较精确的解。模拟法的鲁棒性好,精确度高,能获得输出变量的精确分布,对各类问题都有较好的适应性,但基于蒙特卡洛随机抽样^[12]的模拟法由于采样规模大,导致计算时间长,效率较低。基于拉丁超立方抽样^[17]的伪随机抽样技术缩小了采样规模,有效改善了蒙特卡洛抽样模拟法计算效率低的问题。

为加强对电网的控制,一种新型的综合控制装置——潮流路由器应运而生。潮流路由器的雏形初现在文献[18-20]中,它们各自给出了不同形式的潮流路由系统,并对其控制效果进行了分析。文献[21]在文献[18-20]的基础上提出了一种潮流路由器的通用模型,并采用半定松弛法结合最优潮流(Optimal Power Flow, OPF)对接入 PFR 的输电网的可传输负荷能力进行了分析。

本文将潮流路由器应用于配电网,在文献[21]的基础上,考虑了分布式电源、可调负荷等多种注入源的影响,提出了一种适用于配电网的含潮流路由器的改进支路潮流模型,建立了含潮流路由器的配电网最优潮流模型(Optimal Power Flow with Power Flow Router, PFROPF)。通过对模型进行二阶锥松弛,采用 Gurobi 等商用软件对松弛后的模型进行求解。为进一步考虑风光荷的不确定性,提出了一种基于拉丁超立方采样和二阶锥规划的配电网概率最优潮流求解方法。采用修订的 IEEE33 节点系统验证了所提方法的有效性和准确性。

1 潮流路由器

潮流路由器是一种能对多个流入和流出的潮流进行智能和集中控制的新型控制装置,可代替电网母线作为多种注入源与电网的连接件,具体结构如图1所示。

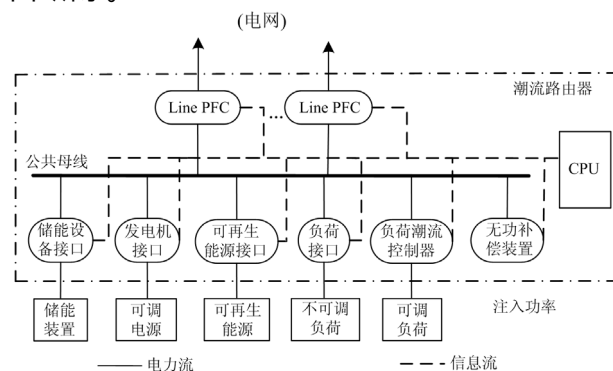


图 1 潮流路由器原理图

Fig. 1 Schematic of power flow router

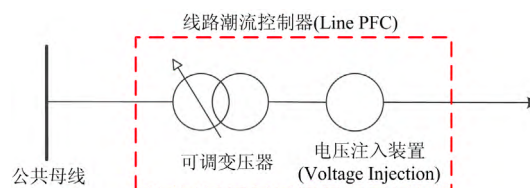


图 2 Line PFC原理图

Fig. 2 Schematic of Line PFC

潮流路由器一方面通过Line PFC的调节对流向各支路的无功潮流进行控制,另一方面通过注入源接口和负荷潮流控制器(Load power flow router, Load PFC)的协调控制调节注入功率。

PFR中重要元件之一的线路潮流控制器(Line Power Flow Controller, Line PFC)是一种线路潮流控制元件,它连接了传输线路与PFR内的公共母线,并能对相应线路的潮流进行控制。如图2所示,Line PFC主要由可控变压器与电压注入装置(Voltage Injection)组成,可控变压器将线路与公共母线调至同一电压水平,电压注入装置能对线路的电压进行调整。

PFR中的注入源接口将储能设备、可调机组、可再生能源、不可调负荷和可调负荷等注入源与公共母线连接,其中可调负荷的接口是负荷潮流控制器,Load PFC可以针对接入可再生能源(Renewable Energy Source, RES)出力的波动调整可调负荷进行功率补偿。

潮流路由器内的各控制元件都由中央处理单元(Central Processing Unit, CPU)进行统一调控。

2 含潮流路由器的最优潮流模型

2.1 无潮流路由器的支路潮流模型

文献[7]提出的辐射网支路潮流模型拓扑结构如图3所示。

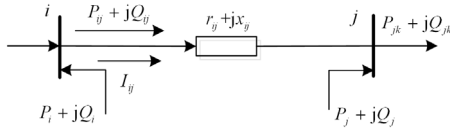


图 3 支路潮流模型

Fig. 3 Branch flow model

图 3 中, I_{ij} 为线路 ij 的电流; $r_{ij} + jx_{ij}$ 为线路 ij 的阻抗; $P_{ij} + jQ_{ij}$ 为线路 ij 在节点 i 侧的视在功率; P_i 和 Q_i 为节点 i 注入的有功功率和无功功率; V_i 为节点 i 的电压。

根据文献[12], 线路 ij 满足以下约束。

$$v_j - v_i = 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) - l_{ij}(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (1)$$

$$l_{ij}v_i = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (2)$$

$$P_j = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - (P_{ij} - l_{ij}r_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - (Q_{ij} - l_{ij}x_{ij}) \quad (4)$$

式中: v_i 和 l_{ij} 分别为节点 i 电压幅值的平方和线路 ij 段的电流幅值的平方; $k:j \rightarrow k$ 表示节点 j 的子节点。

2.2 含潮流路由器的支路潮流模型

在图 3 支路潮流模型基础上, 加入 PFR, 建立含 PFR 的支路潮流模型。如图 4 所示, PFR 与线路联接的接口为 m 和 n , 其中 I_{mn} 为线路 mn 的电流; $r_{mn} + jx_{mn}$ 为线路 mn 的阻抗; $P_{mn} + jQ_{mn}$ 为线路 mn 在接口 m 侧的视在功率; P_i 和 Q_i 为节点 i 注入的有功功率和无功功率。

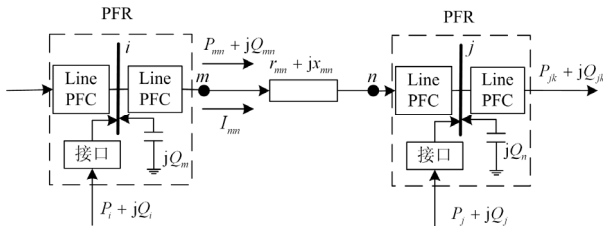


图 4 含PFR的支路潮流模型

Fig. 4 Branch flow model with PFR

Line PFC能对线路的无功功率进行调节, 用 K 表示Line PFC中的可控变压器变比、系数 γ 表示电压注入装置对电压的控制范围, 则图4中Line PFC两侧的电压满足如下约束。

$$V_m = K_m(1 + \gamma_m)V_i \quad i \in N_{\text{PFR}} \quad (5)$$

$$V_n = K_n(1 + \gamma_n)V_j \quad j \in N_{\text{PFR}} \quad (6)$$

$$V_m = V_i \quad i \notin N_{\text{PFR}} \quad (7)$$

$$V_n = V_j \quad j \notin N_{\text{PFR}} \quad (8)$$

式中: V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压; V_m 和 V_n 分别为接口 m 和 n 的电压; N_{PFR} 表示含PFR的节点集合。与Line PFC相关的参数 K 、 γ 需满足以下不等式约束。

$$K_{m,\min} \leq K_m \leq K_{m,\max} \quad (9)$$

$$K_{n,\min} \leq K_n \leq K_{n,\max} \quad (10)$$

$$0 \leq \gamma_m \leq \gamma_{m,\max} \quad (11)$$

$$0 \leq \gamma_n \leq \gamma_{n,\max} \quad (12)$$

式中: K_{\min} 和 K_{\max} 分别表示可控变压器可调变比的下限和上限; γ_{\max} 表示电压注入装置系数 γ 的上限。

加入PFR后, 线路的相关约束在2.1节的基础上修改为

$$v_m - v_n = 2(r_{mn}P_{mn} + x_{mn}Q_{mn}) - l_{mn}(r_{mn}^2 + x_{mn}^2) \quad (13)$$

$$l_{mn}v_m = P_{mn}^2 + Q_{mn}^2 \quad (14)$$

$$P_j = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - (P_{mn} - l_{mn}r_{ij}) \quad (15)$$

$$Q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - (Q_{mn} - l_{mn}x_{ij}) \quad (16)$$

$$P_j = P_{g,j} + P_{wt,j} + P_{pv,j} - P_{d,j} - P_{dnc,j} \quad (17)$$

$$Q_j = Q_{g,j} + Q_{wt,j} + Q_{pv,j} - Q_{d,j} - Q_{dnc,j} + Q_{Cj} \quad (18)$$

$$Q_{Ci,\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,\max} \quad (19)$$

$$Q_{Cj,\min} \leq Q_{Cj} \leq Q_{Cj,\max} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{dncj} \leq P_{dncj,\max} \quad (21)$$

$$0 \leq Q_{dncj} \leq Q_{dncj,\max} \quad (22)$$

式中: v_m 和 l_{mn} 分别为节点 m 电压幅值的平方和线路 mn 段的电流幅值的平方; $k:j \rightarrow k$ 表示节点 j 的子节点; $P_{g,j}$ 和 $Q_{g,j}$ 表示接入节点 j 的可调电源的有功出力 and 无功出力; $P_{wt,j}$ 、 $Q_{wt,j}$ 表示接入节点 j 的分布式风电的有功和无功出力; $P_{pv,j}$ 、 $Q_{pv,j}$ 表示接入节点 j 的分布式光伏的有功和无功出力; P_{dncj} 、 Q_{dncj} 表示节点 j 的可调有功负荷和无功负荷; $P_{dncj,\max}$ 、 $Q_{dncj,\max}$ 表示节点 j 的可调有功负荷和无功负荷上限; $P_{d,j}$ 、 $Q_{d,j}$ 表示节点 j 的不可调有功负荷和无功负荷; Q_C 、 $Q_{C\max}$ 、 $Q_{C\min}$ 表示 PFR 的无功补偿容量及其上下限。

对于含可调电源的节点, 其可调电源的出力约束为

$$P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \quad \forall i \in N_g \quad (23)$$

$$Q_{g,i}^{\min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{\max} \quad \forall i \in N_g \quad (24)$$

式中： $P_{g,i}^{\max}$ 、 $P_{g,i}^{\min}$ 表示可调电源的有功出力上、下限； $Q_{g,i}^{\max}$ 、 $Q_{g,i}^{\min}$ 表示可调电源的无功出力上、下限； N_g 表示含可调机组的节点集合。

2.3 含潮流路由器的配电网最优潮流建模

基于2.2节，下面给出基于支路潮流模型的含PFR的配电网最优潮流模型。

$$\begin{aligned} & \min f \\ & \text{式(5)—式(24)} \\ & P_{mn}^{\min} \leq P_{mn} \leq P_{mn}^{\max} \end{aligned} \quad (25)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \quad (26)$$

式中： f 为目标函数，可为网损最小、发电机成本最小等等； P_{mn} 、 P_{mn}^{\max} 、 P_{mn}^{\min} 分别为线路 mn 的有功潮流及其有功潮流约束上下限； v_i^{\max} 和 v_i^{\min} 分别为节点 $v_m = K_m^2(1 + \gamma_m)^2 v_i$ 电压幅值平方的上下限。

3 求解方法

3.1 二阶锥松弛

所建立的最优潮流模型由于式(5)、式(6)、式(14)的存在实际为非凸非线性规划，将通过对上述公式进行松弛，把原模型转化为二阶锥规划模型进行求解，具体方法如下所述。

首先对式(5)等式两边平方，得到式(27)，式(27)右侧满足不等式约束(28)，则等式约束式(5)可以松弛为不等式约束(29)。

$$v_m = K_m^2(1 + \gamma_m)^2 v_i \quad (27)$$

$$K_{m,\min}^2(1 - \gamma_{m,\max})^2 v_i \leq K_m^2(1 + \gamma_m)^2 v_i \leq K_{m,\max}^2(1 + \gamma_{m,\max})^2 v_i \quad (28)$$

$$K_{m,\min}^2(1 - \gamma_{m,\max})^2 v_i \leq v_m \leq K_{m,\max}^2(1 + \gamma_{m,\max})^2 v_i \quad (29)$$

由于 K_m^2 、 $(1 + \gamma_m)^2$ 的可行域都是凸的，且 v_i 的可行域是线性的，所以式(29)满足凸规划约束要求。式(6)的转换与式(5)同理。

对于式(14)，将二次等式约束松弛为旋转二阶锥约束：

$$l_{mn} v_m \geq P_{mn}^2 + Q_{mn}^2 \quad (30)$$

通过以上松弛，原规划模型转化成了二阶锥规划模型，将采用在求解二阶锥规划上有较好效果的Gurobi、Mosek、Cplex等算法包进行求解。

3.2 基于拉丁超立方体抽样的概率最优潮流计算

模拟法概率最优潮流通常采用蒙特卡罗法进行随机抽样，但其存在抽样次数多、模拟时间长等缺点。拉丁超立方体抽样作为一种新型的抽样技术，在与蒙特卡罗法精确度接近的情况下，具有抽样次

数少、采样值能够覆盖输入随机变量的整个分布区间等优势。文献[17]阐述了拉丁超立方抽样的原理，并将其应用于概率潮流的求解。本文将拉丁超立方采样与二阶锥松弛最优潮流模型相结合，提出一种新的概率最优潮流计算方法，具体计算步骤如下：

(1) 输入网络参数和采样次数 N ；(2) 计算网络中随机变量数量 k ；(3) 采用拉丁超立方采样生成 $k \times N$ 阶样本矩阵，矩阵的每一列为一个样本；(4) 对样本矩阵的每一列代入松弛后的含PFR的最优潮流模型并调用Gurobi算法包进行一次最优潮流计算；(5) 输出各参数的统计特征值与概率分布。

4 算例分析

采用Matlab-YALMIP平台对所提最优潮流模型进行编程，调用Gurobi等算法包进行计算。系统的硬件环境为Intel i7-4790CPU 3.60 GHz、16 GB内存，操作系统为Win10 64 bit。

以网损最小为目标函数，采用修订的IEEE33节点配电系统进行算例测试。在IEEE33系统^[22]的节点6、14和29各安装1台PFR装置。用PFR n 表示节点 n 处安装的PFR，接入各节点PFR的分布式电源、可调负荷及其参数见表1。三台PFR各接入一台可调机组，三台PFR及三台接入PFR的可调机组参数相同，具体参数见表2，Line PFC可调变压器变比为额定变比。设系统中节点电压幅值上、下限(标么值)分别为1.05和0.95，线路可传输最大有功潮流上限为10 MW。

表1 接入PFR的注入源参数

	风电机组		光伏机组		可调负荷	
	额定功率 (MW) × 台数	功率 因素	最大功率 (MW) × 台数	功率 因素	可调上 限/MW	功率 因素
PFR 6	200 × 1	0.93	0	0.93	0.2 P_{d6}	0.9
PFR 14	200 × 1	0.93	0	0.93	0.2 P_{d14}	0.9
PFR 29	0	0.93	300 × 1	0.93	0.2 P_{d29}	0.9

注：表中 P_{di} ($i=1,2,\dots,n$)表示节点 i 的原有有功负荷。

表2 PFR及可调机组参数

可调 范围	可调机组 有功出力/ MW	可调机组 无功出力/ Mvar	Line PFC 电压注入 系数 γ	PFR并联 补偿容量/ kvar
最大值	0.5	0.5	0.05	300
最小值	0	-0.5	0	-300

4.1 含PFR的最优潮流二阶锥规划模型准确性分析

文献[7]给出了纯负荷辐射状网络下二阶锥松弛最优潮流模型准确的几个充分条件，如无负荷上限，无电压上限约束等，文献[23]则对高渗透率DG

接入后,模型准确的充分条件进行了补充。文[7-8,23-24]均指出若目标函数是凸函数且为支路电流的严格增函数,则模型准确收敛。为分析含PFR的辐射配电网最优潮流模型的准确性,在此定义松弛间隙 G 。

$$G = |l_{mn} v_m - P_{ij}^2 - Q_{ij}^2| \quad (31)$$

以修订的33节点系统为例,调用Gurobi算法包对松弛后的最优潮流模型进行求解,得到各线路的松弛间隙如图5所示。可以看到,除节点1和节点18松弛间隙 G 的数量级为 10^{-7} ,其余节点松弛间隙的数量级均为 10^{-8} 或以下,满足计算精度要求,说明松弛后的模型是准确的。

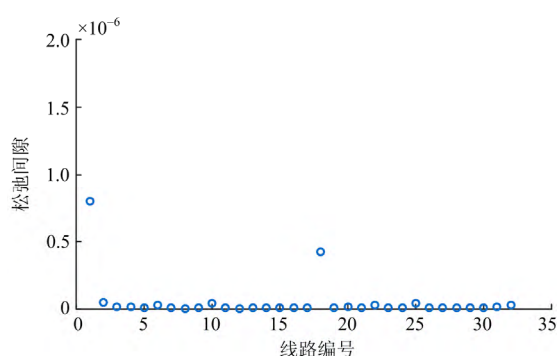


图5 各线路松弛间隙散点图

Fig. 5 Scatter plot of relaxation gap on each line

4.2 PFR 控制效果分析

使用修订的IEEE33节点系统对PFR的控制效果进行分析。表3显示多种算法包的计算结果是一致的,验证了最优解的稳定性;同时可以看到接入PFR后系统的网损相比原系统下降了59.15%,降损效果相当显著。

表3 不同算法包求解情况

Table 3 Solutions of different algorithm packages

算法包	求解时间/s	初始网损/MW	初始网损率/%	优化后的网损/MW	优化后的网损率/%
Gurobi	0.01	0.202 0	5.386	0.082 50	2.172 6
Mosek	0.01	0.202 0	5.386	0.082 50	2.172 6
Cplex	0.01	0.202 0	5.386	0.082 50	2.172 6

图6显示了优化前后系统的节点电压幅值,优化后的节点电压更加平稳,且都满足节点电压约束条件。

表4显示了不同渗透率下的优化效果,其结果表明,随着分布式电源渗透率的不断升高,PFR能通过对潮流的控制,在满足电压安全约束的条件下,使网损保持较低的水平。且在DG接入容量低于1.3 MW时,网损随着渗透率的升高而不断降低,而当

DG接入容量达到1.6 MW时,电压约束等限制了潮流路由器的调控效果,导致网损上升。显示PFR能提升配电系统接纳分布式电源的能力。

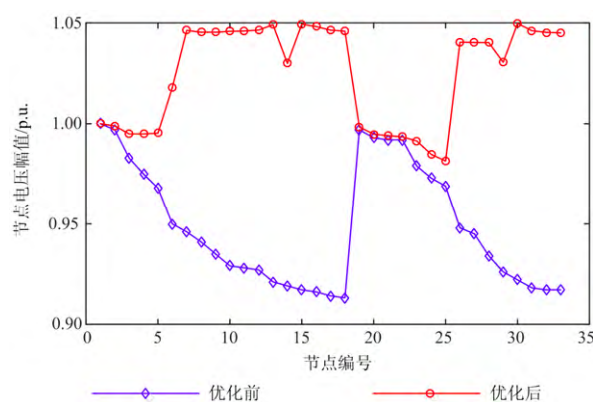


图6 IEEE33节点系统优化前后的节点电压幅值

Fig. 6 Bus voltage amplitude of IEEE33 system before and after optimization

表4 不同渗透率下的优化效果

Table 4 Optimization effect of different penetration rates

渗透率/%	DG接入容量/MW	有功网损/MW	网损率/%	降损率/%	V_{\max} /p.u.
10.411	0.4	0.106 53	2.787 7	47.26	1.049 9
18.433	0.7	0.082 50	2.172 6	59.15	1.049 8
26.469	1.0	0.063 03	1.668 3	67.67	1.049 9
34.446	1.3	0.048 31	1.280 7	76.08	1.049 9
41.401	1.6	0.125 66	3.251 6	37.79	1.049 9

注: V_{\max} 表示最大节点电压幅值,各PFR接入的分布式电源容量分别以100 kW的增量增长。

4.3 概率最优潮流分析

为了考虑接入系统的风光荷的不确定性,假定接入PFR的分布式电源及系统负荷服从表5所示的概率分布。

表5 风光荷概率分布及其参数

Table 5 Probability distributions and parameters of wind power, photovoltaic and load

注入源	概率分布	相关参数				
类型	类型	形状参数	尺度参数	切入风	切出风	额定风
风电	Weibull分布	形状参数 k	尺度参数 $\lambda/(m/s)$	切入风速/(m/s)	切出风速/(m/s)	额定风速/(m/s)
		2	10	3	25	15
光伏	Beta分布	α 参数		β 参数		
		0.45		9.18		
负荷	高斯分布	期望		方差		
		P_d		$0.05P_d$		

仍以网损最小为目标函数,采用前述基于拉丁超立方抽样的计算方法,并与蒙特卡罗随机抽样所得结果进行比较。

为验证概率最优潮流下二阶锥松弛的准确性,计算了1 000次拉丁超立方模拟的松弛间隙,如图7所示,松弛间隙 G 的数量级为 10^{-6} ,且大部分处于 10^{-7} 数量级及以下,满足误差要求。

以蒙特卡罗法5 000次模拟得到的随机变量的期望值和标准差为基准,用 μ_{MCS} 和 σ_{MCS} 表示;用 μ_{SIM} 和 σ_{SIM} 表示拉丁超立方抽样得到的随机变量的期望值与标准差;定义期望值和标准差的相对误差如式(32)和式(33)所示。

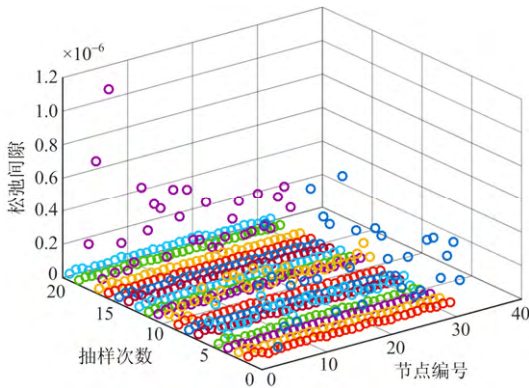


图7 部分样本松弛间隙散点图

Fig. 7 Scatter plot of partial sample's relaxation gap

$$\varepsilon_{\mu} = \left| \frac{\mu_{\text{MCS}} - \mu_{\text{SIM}}}{\mu_{\text{MCS}}} \right| \times 100\% \quad (32)$$

$$\varepsilon_{\sigma} = \left| \frac{\sigma_{\text{MCS}} - \sigma_{\text{SIM}}}{\sigma_{\text{MCS}}} \right| \times 100\% \quad (33)$$

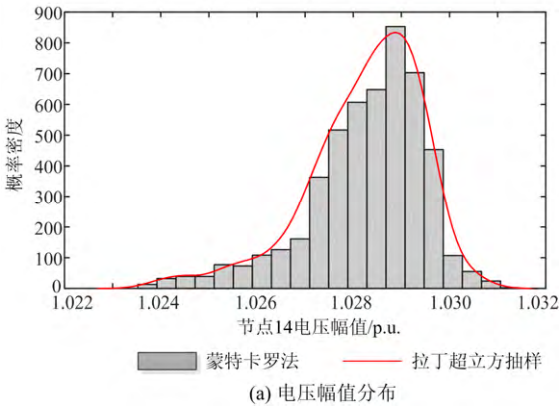
表6给出了不同采样规模拉丁超立方抽样的网损期望值与标准差的相对误差,拉丁超立方采样1 000次的期望值与标准差的相对误差分别为0.104%和0.108%,与5 000次蒙特卡罗法模拟精度接近,说明相同精度下拉丁超立方采样规模远小于蒙特卡罗随机模拟法。

图8对比了两种方法得到的随机变量的概率分布,可以看到拉丁超立方采样和蒙特卡罗采样的拟合度高。图8(a)显示两种方法得到的节点14的电压幅值分布在1.023~1.032 p.u.,满足节点电压约束。图8(b)显示线路6-26的有功潮流分布在0.5~0.7 MW,满足支路传输容量约束。图8(c)显示考虑了风光不确定性的有功网损分布在0.065~0.085 MW,表明了PFR能通过控制潮流降低系统网损。

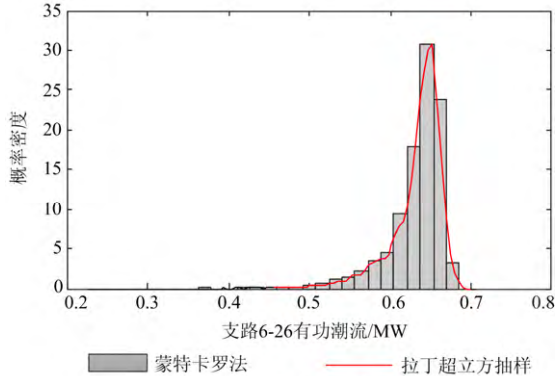
表6 不同采样规模下拉丁超立方网损计算相对误差

Table 6 Relative error of Latin hypercube calculation on loss under different sampling scales

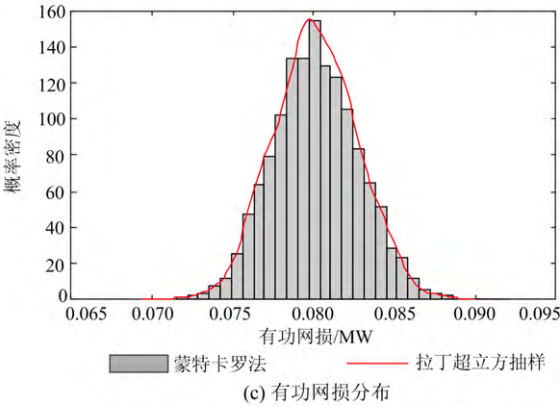
模拟方法	采样规模	期望相对误差	标准差相对误差
		$\varepsilon_{\mu}/\%$	$\varepsilon_{\sigma}/\%$
拉丁超立方 采样	200	0.615	1.878
	500	0.290	0.287
	800	0.213	0.263
	1 000	0.104	0.108



(a) 电压幅值分布



(b) 支路有功潮流分布



(c) 有功网损分布

图8 输出变量的概率分布

Fig. 8 Probability distribution of output variables

5 结论

提出了一种适用于配电网的含潮流路由器的改进支路潮流模型,并基于此建立了含PFR的配电网最优潮流模型。采用二阶锥松弛技术将模型转化为二阶锥规划模型,并调用Gurobi等商用算法软件包进行求解。通过对算例的求解,验证了模型的准确性,并表明PFR既能显著降低网损,同时也能提升配电系统接纳分布式电源的能力。

考虑风光荷的不确定性,提出了拉丁超立方采样和二阶锥规划相结合的概率最优潮流求解方法,算例结果显示该方法在保证精确性的同时,提高了求解效率。

参考文献

- [1] DOMMEL H W, TINNEY W F. Optimal power flow solution[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87: 1866-1876.
- [2] 张昕, 张勇, 钱伟杰, 等. 基于简化零空间内点法 VSC-HVDC 离散化最优潮流的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 15-23.
ZHANG Xin, ZHANG Yong, QIAN Weijie, et al. Research on the optimal power flow of VSC-HVDC based on the simplified null space interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 15-23.
- [3] 马玲, 于青, 刘刚, 等. 基于量子差分进化算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 39-43.
MA Ling, YU Qing, LIU Gang, et al. Power system reactive power optimization based on quantum DE algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 39-43.
- [4] 蔡博, 黄少锋. 基于多目标粒子群算法的高维多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 77-84.
CAI Bo, HUANG Shaofeng. Multi-objective reactive power optimization based on the multi-objective partial swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 77-84.
- [5] 汤晓青, 刘辉, 范宇, 等. 基于改进多目标遗传算法的实时发电市场优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 65-71.
TANG Xiaqing, LIU Hui, FAN Yu, et al. Analysis of the optimal dispatch in real-time generation market using an improved multi-objective genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 65-71.
- [6] 何天雨, 卫志农, 孙国强, 等. 基于网损等值负荷模型的改进直流最优潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 58-64.
HE Tianyu, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Modified direct current optimal power flow algorithm based on net loss equivalent load model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 58-64.
- [7] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [8] LOW S H. Convex relaxation of optimal power flow-part I: formulations and equivalence[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1(1): 15-27.
- [9] 刘斌, 刘锋, 梅生伟, 等. 基于二阶锥优化的含有载调压变压器主动配电网最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 40-47.
LIU Bin, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Optimal power flow in active distribution networks with on-load tap changer based on second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 40-47.
- [10] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1644.
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1644.
- [11] 韩禹歆, 陈来军, 王召健, 等. 基于自适应步长 ADMM 的直流配电网分布式最优潮流[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 26-37.
HAN Yuxin, CHEN Laijun, WANG Zhaojian, et al. Distributed optimal power flow in direct current distribution network based on alternative direction method of multipliers with dynamic step size[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 26-37.
- [12] 丁明, 李生虎, 黄凯. 基于蒙特卡罗模拟的概率潮流计算[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 10-14.
DING Ming, LI Shenghu, HUANG Kai. Probabilistic load flow analysis based on Monte-Carlo simulation[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 10-14.
- [13] MORALES J M, PEREZ-RUIZ J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1594-1601.
- [14] ZOU Bin, XIAO Qing. Solving probabilistic optimal power flow problem using quasi Monte Carlo method and

- ninth-order polynomial normal transformation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 300-307.
- [15] 潘炜, 刘文颖, 杨以涵. 概率最优潮流的点估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 28-33.
PAN Wei, LIU Wenying, YANG Yihan. Point estimate method for probabilistically optimal power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 28-33.
- [16] 代景龙, 白晓清, 鲍海波. 考虑源荷不确定性的概率最优潮流[J]. 现代电力, 2016, 33(1): 34-40.
DAI Jinglong, BAI Xiaoqing, BAO Haibo. Probabilistic optimal power flow by considering the uncertainty of source and demand side[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(1): 34-40.
- [17] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 采用拉丁超立方采样的电力系统概率潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 32-35.
YU Han, ZHONG Zhiyong, HUANG Jiebo, et al. Digital substation communication network simulation based on epochs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 32-35.
- [18] CHEN H, IYER A, HARLE Y R, et al. Dynamic grid power routing using controllable network transformers (CNT) with decoupled closed-loop controller[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 2361-2372.
- [19] NGUYEN P, KLING W, RIBEIRO P. Smart power router: a flexible agent-based converter interface in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 487-495.
- [20] SÁNCHEZ-SQUELLA A, ORTEGA R, GRIÑO R, et al. Dynamic energy router[J]. IEEE Control System, 2010, 30(6): 72-80.
- [21] LIN J, LI V O K, LEUNG K C, et al. Optimal power flow with power flow routers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(1): 531-543.
- [22] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [23] GAN Lingwen, LI Na, TOPCU U, et al. Exact convex relaxation of optimal power flow in radial networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(1): 72-87.
- [24] ABDELOUADOUD S Y, GIRARD R, NEIRAC F P, et al. Optimal power flow of a distribution system based on increasingly tight cutting planes added to a second order cone relaxation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69: 9-17.

收稿日期：2018-03-29； 修回日期：2018-06-07

作者简介：

李成豪(1994—)，男，硕士研究生，研究方向为主动配电网优化；

王 淳(1963—)，男，博士，教授，主要研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用。E-mail: cu_wang@126.com

(编辑 姜新丽)