

主动配电网最优潮流研究及其应用实例

高红均¹, 刘俊勇¹, 沈晓东¹, 徐芮²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川省 成都市 610065

2. 国网眉山供电公司, 四川省 眉山市 620010)

Optimal Power Flow Research in Active Distribution Network and Its Application Examples

GAO Hongjun¹, LIU Junyong¹, SHEN Xiaodong¹, XU Rui²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China

2. State Grid Meishan Electric Power Supply Company, Meishan 620010, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Research on optimal power flow is indispensable in distribution network planning and operation. After the integration of distributed energy resource (DER) in the active distribution network, it becomes much more significant. Traditional heuristic algorithms fail to guarantee optimality and may be computationally cumbersome for real time operation in active distribution network. Moreover, the linearization based optimal power flow method is infeasible in distribution network due to the low R/X ratio of distribution lines. A dynamic optimal power flow framework based on second order cone programming (SOCP) was proposed in this paper to transform the original non-linear models to SOCP problems for fast solving. First, the second order conic relaxation (SOCR) based the basic dynamic optimal power flow model was presented. Then some main elements in the active distribution network were modeled via linearization. Those elements included active management devices, distribution network reconfiguration, demand response and comprehensive loads in this study. The accuracy of the relaxed model and approximation means were also analysis. Finally, the proposed second order conic relaxation based dynamic optimal power flow (SOCR-DOPF) was verified feasible by three application examples in active distribution network.

KEY WORDS: active distribution network; dynamic optimal power flow (DOPF); second order conic relaxation (SOCR); distribution network reconfiguration; comprehensive loads

摘要: 最优潮流研究在配电网规划运行中不可或缺,且在大量分布式能源接入的主动配电网环境下尤为重要。传统的启发式算法在全局最优解和求解速度上均无法满足主动配

网运行要求,而基于线性化的最优潮流方法在高阻抗的配电网中适用性也较弱。基于此,文章建立了基于二阶锥规划(second order cone programming, SOCP)的动态最优潮流模型框架,力图将原非线性规划模型松弛转化为SOCP进行快速求解。首先,给出了基于二阶锥松弛的配电网动态最优潮流基本模型;然后,对主动配电网中各重要参与元素进行相应的线性化建模处理以便高效求解,如主动管理设备、配电网重构、需求响应及综合负荷等;同时,分析了松弛模型和近似等效的准确性。最后,通过3个应用实例验证了该最优潮流模型的松弛准确性和有效性。

关键词: 主动配电网; 动态最优潮流; 二阶锥松弛; 配电网重构; 综合负荷

0 引言

近年来,主动配电网发展受到了越来越多的关注。同时,各类分布式能源(distributed energy resource, DER)的接入给配电网规划运行带来了新的挑战,特别是在主动配电网环境下主动管理(active management, AM)、主动控制、主动优化等领域。开展适用于主动配电网各领域的算法或高性能计算工具等相关研究尤为迫切^[1]。

文献[2]指出无论是主动配电网运行控制还是扩展规划,其本质均为配电网最优潮流范畴,因此最优潮流在配电网发展过程中具有重要意义。国内外学者对配电网最优潮流做了大量的研究工作。由于配电网自身的网络结构特性,如线路电阻、电抗比值较大,辐射性约束等,其最优潮流算法研究相较于输电网有较大区别,传统输电网应用较为广泛的直流最优潮流算法在配电网研究中无法适用^[3]。因此,配电网最优潮流研究主要集中于交流最优潮流方面。交流最优潮流由于其潮流约束的非线性特征,其本质为非线性规划。基于人工智能的启发式

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2014AA051901); 国家自然科学基金项目(51377111)。

Project Supported by National High Technology Research and Development Program of China (2014AA051901); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377111).

算法因其简单、易模拟复杂约束等优势,在求解非线性规划模型中得到了广泛应用。其在配电网最优潮流中也逐渐被尝试并进行了有效性验证,如进化算法^[4]、粒子群算法^[5]、遗传算法^[6]等。而智能算法在求解非线性模型时也存在明显的问题,如无法保证全局最优、容易陷入局部最优、求解速度较慢等。

正是由于智能算法的上述问题,越来越多的学者开始探索有效的数值分析法,以提高配电网最优潮流的求解速度,以及保证其最优性,进而适应主动配电网规划运行要求,特别是实时运行的主动控制环节。针对此需求,文献[7-8]首次系统性的建立了以 Distflow^[9]为基础的支路潮流模型(branch flow model, BFM)来求解最优潮流模型框架,并提出了两步松弛步骤: 1)消去电压和电流相角; 2)二阶锥松弛(second order conic relaxation, SOCR)。同时,文献[7-8]也给出了松弛准确性证明。二阶锥规划(second order cone programming, SOCP)主要通过将原模型转化为凸规划形式,进而获得全局最优解以及良好的求解速度。采用 SOCP 求解最优潮流,其主要难点在于松弛模型准确性条件。文献[10-11]给出了辐射性网络条件下 SOCR 准确的几个充分条件,如无负荷上限约束限制,无电压上限约束限制下的在纯负载网络和均一网络等。文献[12-13]对充分条件进行了归纳总结,分为注入功率限制、电压幅值限制和节点电压相角偏差三类,并对最优潮流目标函数进行了相应的说明,假设优化目标是关于支路电流的增函数^[14]。此外,在主动配电网高渗透分布式电源(distributed generation, DG)接入环境下,文献[15]对上述 SOCR 准确性的充分条件进行了补充分析,并通过 4 个 IEEE 标准系统和 2 个实际系统验证了松弛的准确性。

同时,文献[1,16]在直角坐标系下将恒功率负荷模型扩展到综合负荷模型,相比直角坐标系,极坐标系下的潮流形式更加普遍,因此本文尝试给出极坐标下综合负荷模型的近似形式。此外,在主动配电网规划运行优化模型中,不可避免会出现离散变量,离散变量将会给模型求解带来一定的难度,混合整数编程(mixed integer programming, MIP)建模,特别是一些商业软件或算法包的出现良好的解决了该问题,如 CPLEX, GUROBI 等,其在配电网重构^[17-18]、无功优化^[19]、配电网规划^[20]等均得到了广泛应用。此外,上述研究均局限于传统单时段静态最优潮流范畴,而实际中的优化多集中于多时

段下的整体协调,实为动态最优潮流(dynamic optimal power flow, DOPF)。

综上所述与分析,为适应主动配电网规划运行的多时段优化要求,本文建立了基于二阶锥松弛的配电网动态最优潮流模型(SOCR-DOPF)框架,并对主动配电网各参与元素(如有载调压电力变压器(on-load tap changer, OLTC),储能系统(energy storage system, ESS)等)关键约束的线性建模处理方法进行相应的探索,进而将配电网非线性最优潮流问题转化为基于二阶锥规划进行快速求解。同时,对网络辐射性和连通性约束限制也进行了充分说明。此外,首次给出了极坐标下综合负荷模型的近似等效形式。最后,从主动配电网有功-无功协调优化、综合负荷应用、配电网重构 3 个实例验证了该最优潮流框架的有效性。

1 基于支路潮流的配电网动态最优潮流模型

1.1 配电网基本结构

无论是传统配电网,还是高渗透率 DER 接入下可能导致双向潮流的主动配电网,其主要稳态运行模式均为辐射状运行,结构简图如图 1。针对辐射(树型)结构拓扑网络,可定义有向图进行描述,记支路 ij 表示潮流流向正方向为节点 i 到节点 j , $\delta(j)$ 为以 j 为首端节点的支路末端节点集合, $\pi(j)$ 为以 j 为末端节点的支路首端节点集合。

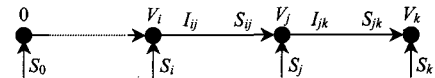


图1 辐射性配电网示意图

Fig. 1 Diagram for radial distribution network

图中: S_{ij} 和 s_j 表示复功率, $S_{ij} = P_{ij} + iQ_{ij}$ 以及 $s_j = p_j + iq_j$, 且支路复阻抗 $Z_{ij} = r_{ij} + ix_{ij}$; 集合 B 表示网络中所有节点集合; 节点 0 为变电站节点, 传统最优潮流中, 电压保持恒定, 若装有 OLTC, 则电压会随着 OLTC 变比变化而变化; E 表示网络中所有支路集合。并计网络中变电站 N^{sub} 个、节点 N^{bus} 个及支路 N^{line} 条。

1.2 传统静态最优潮流基本模型

根据文献[7]知,基于支路潮流模型的最优潮流(BFM-OPF)一般模型^[15]如下:

$$\min f(p, q, P, Q, V, I) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} p_j = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij} - I_{ij}^2 r_{ij}) + g_j V_j^2, \forall j \in B \\ q_j = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij} - I_{ij}^2 x_{ij}) + b_j V_j^2, \forall j \in B \end{cases} \quad (2)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) + I_{ij}^2(r_{ij}^2 + x_{ij}^2), \quad \forall ij \in E \quad (3)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2}, \quad \forall ij \in E \quad (4)$$

$$I_{ij} \leq I_{ij} \leq \bar{I}_{ij}, \quad \forall ij \in E \quad (5)$$

$$V_j \leq V_j \leq \bar{V}_j, \quad \forall j \in B^+ \quad (6)$$

$$\begin{cases} p_j \in R_j^p \\ q_j \in R_j^q \end{cases}, \quad \forall j \in B \quad (7)$$

由式(1)–(6)可以看出: 1) 最优潮流的优化变量包含节点注入功率(p 、 q)、支路潮流(P 、 Q)、节点电压(V)和支路电流(I), 变电站节点电压不作为优化变量; 2) 式(1)为目标函数, 可为网损最小, 变电站节点购电最小等; 3) 式(2)–(6)为通用约束条件, 即对所有辐射性网络最优潮流均一致, 包括潮流平衡约束和安全约束; 4) 式(7)为节点注入功率相关约束, 因模型的不同而存在一定差异。

原 BFM-OPF 为非线性规划模型, 令 $\tilde{I}_{ij} = I_{ij}^2$ 及 $\tilde{V}_j = V_j^2$, 并对式(4)进行 SOCR 转化^[11], 得:

$$\min f(p, q, P, Q, \tilde{V}, \tilde{I}) \quad (8)$$

s.t.

$$\begin{cases} p_j = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij} - \tilde{I}_{ij}r_{ij}) + g_j \tilde{V}_j, \quad \forall j \in B \\ q_j = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij} - \tilde{I}_{ij}x_{ij}) + b_j \tilde{V}_j, \quad \forall j \in B \end{cases} \quad (9)$$

$$\tilde{V}_j = \tilde{V}_i - 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) + \tilde{I}_{ij}(r_{ij}^2 + x_{ij}^2), \quad \forall ij \in E \quad (10)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{V}_j \end{bmatrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{V}_j, \quad \forall ij \in E \quad (11)$$

$$I_{ij} \leq \tilde{I}_{ij} \leq \bar{I}_{ij}^2, \quad \forall ij \in E \quad (12)$$

$$V_j \leq \tilde{V}_j \leq \bar{V}_j^2, \quad \forall j \in B^+ \quad (13)$$

上式(7)及(8)–(13)构成了松弛后的静态最优潮流基本形式。文献[12–13]证明了在目标函数为凸函数和严格递增函数情况下, 对大部分配电网结构网络 SOCR 是严格准确的。

1.3 配电网动态最优潮流模型

上述模型为传统经典的静态(单时段)最优潮流模型, 而实际中的应用主要集中于多时段模型优化, 本文将单时段潮流模型扩展到动态优化中, 而形成动态最优潮流模型。为便于表述, 采用向量的形式进行表达, 可得如下基于二阶锥松弛的动态

最优潮流模型:

$$\begin{cases} \min \sum_{t \in T} f(x_t) \\ \text{s.t. } x_t \in X_t, \quad \forall t \\ \|A_{ij,t}x_t\| \leq b_{ij,t}^T x_t, \quad \forall t, \forall ij \in E \\ \sum_{t \in T} B_t x_t \leq c \\ \sum_{t \in T} C_t x_t = d \end{cases} \quad (14)$$

式中: t 为时段标识; T 为总时段数。式(14)在目标函数和约束条件中添加了多时段之间的线性耦合关系, 后面章节对某些元素将进行具体阐述, 如 OLTC、ESS 等。 $x_t \in X_t, \forall t$ 表征了传统单时段最优潮流模型中的约束关系, 如上下限约束, 潮流等式约束等。 $\sum_{t \in T} B_t x_t \leq c$ 为各时段各支路下的二阶锥约束关系。式(14)实为二阶锥规划问题, 若变量中存在整数变量, 则为混合整数二阶锥规划问题(MISOCP), 可采用商业软件或算法包的出现良好的求解。

2 主动配电网框架下的扩充形式

在主动配电网框架下, 主动管理包括: 1) OLTC 调节; 2) 无功装置调节, 包括离散无功补偿和连续无功调节; 3) 有功调节, 包括储能调节以及电动汽车调节; 4) 分布式电源自身调节。同样, 需求响应作为主动配电网的重要参与元素也应充分利用。此外, 为适应模型的通用性, 文中也增加了综合负荷模型。由于最优潮流的目标函数基本为线性或二次形式, 二次形式也能通过分段线性等方式进行转化, 且效果均较满意, 因此本文主要侧重于对各主动管理设备相关的约束条件进行线性建模处理。此外根据文献[2]知, 网络灵活性在主动配电网规划运行中举足轻重, 其主要思想为网络重构(开关调节)。本文对网络重构相关约束限制也进行了探讨, 如辐射性约束等。

2.1 主动管理元素建模

2.1.1 OLTC 建模

OLTC 主要调节 HV/MV 低压侧电压值, 增加了 OLTC 后, 变电站母线节点 V_0 转换成可调变量, 可进行如下替换:

$$\begin{cases} V_{j,t}^2 \leq (V_{j,t}^{\text{Base}})^2 r_{j,t} \leq \bar{V}_j^2 \\ r_j^{\min} \leq r_{j,t} \leq r_j^{\max} \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{OLTC}} \quad (15)$$

式中: B^{OLTC} 为包含 OLTC 的变电站节点集合; $V_{j,t}^{\text{Base}}$ 为 HV/MV 变压器高压侧电压值, 为恒定值; r_j^{\max}

和 r_j^{\min} 为 OLTC 可调变比上下限的平方; $r_{j,t}$ 为 OLTC 变比平方, 定义为二次侧与一次侧的比值, 实为离散值变量, 可进一步处理为如下包含 0-1 变量的关系:

$$r_{j,t} = r_j^{\min} + \sum_s r_{j,s} \sigma_{j,s,t}^{\text{OLTC}}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{OLTC}} \quad (16)$$

式中: $r_{j,s}$ 表示 OLTC 档位 s 与档位 $s-1$ 变比平方的差值, 即相邻调节增量。 $\sigma_{j,s,t}^{\text{OLTC}}$ 为 0-1 标识变量, 若考虑实际中受到调节次数限值等约束, 可进一步约束为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{j,1,t}^{\text{OLTC}} &\geq \sigma_{j,2,t}^{\text{OLTC}} \geq \sigma_{j,\text{SR},t}^{\text{OLTC}}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{OLTC}} \\ \delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} + \delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}} &\leq 1, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{OLTC}} \\ \sum_s \sigma_{j,s,t}^{\text{OLTC}} - \sum_s \sigma_{j,s,t-1}^{\text{OLTC}} &\geq \delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} - \delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}} \text{SR}_j, \\ &\quad \forall t, \forall j \in B^{\text{OLTC}} \\ \sum_s \sigma_{j,s,t}^{\text{OLTC}} - \sum_s \sigma_{j,s,t-1}^{\text{OLTC}} &\leq \delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} \text{SR}_j - \delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}}, \\ &\quad \forall t, \forall j \in B^{\text{OLTC}} \\ \sum_{t \in T} (\delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} + \delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}}) &\leq N_j^{\text{OLTC,max}}, \quad \forall j \in B^{\text{OLTC}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: $\delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}}$ 和 $\delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}}$ 表示 OLTC 档位调节变化标识, 为 0-1 变量, 若 $\delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} = 1$, 则 OLTC 档位值在第 t 时段比 $t-1$ 时段档位值大, $\delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}}$ 类似; $\text{SR}_j^{\text{OLTC}}$ 为档位最大变化范围; $N_j^{\text{OLTC,max}}$ 为 T 时段内 OLTC 档位最大允许调节次数。

2.1.2 无功调节装置建模

1) 离散无功补偿建模。以分组投切电容器组 (capacitor banks, CB) 为例。

$$\begin{cases} Q_{j,t}^{\text{CB}} = y_{j,t}^{\text{CB}} Q_j^{\text{CB},\text{step}} \\ y_{j,t}^{\text{CB}} \leq Y_j^{\text{CB},\text{max}} \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{CB}} \quad (18)$$

式中: B^{CB} 为 CB 节点集合; $y_{j,i}^{\text{CB}}$ 为投运组数, 为离散变量值; $Y_j^{\text{CB,max}}$ 为节点 j 连接 CB 组数上限; $Q_j^{\text{CB,step}}$ 为每组 CB 的补偿功率。考虑到设备寿命或经济性等因素, 离散无功补偿多受调节次数限制, 因此一般包括多时段内总操作次数限制; $N_j^{\text{CB,max}}$ 为操作次数上限:

$$\sum_{t \in T} |y_{j,t}^{\text{CB}} - y_{j,t-1}^{\text{CB}}| \leq N_j^{\text{CB}, \max}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{CB}} \quad (19)$$

此外，对于上式中的绝对值约束，可进行如下处理，具体详见文献[14]，增加表征相邻时段间 CB 补偿容量变化的辅助变量 $\delta_{j,t}^{\text{CB}} = |y_{j,t}^{\text{CB}} - y_{j,t-1}^{\text{CB}}|$ ，则可得：

$$\begin{cases} \sum_{t \in T} \delta_{j,t}^{\text{CB}} \leq N_j^{\text{CB,max}} \\ -\delta_{j,t}^{\text{CB}} Y_j^{\text{CB,max}} \leq y_{j,t}^{\text{CB}} \leq \delta_{j,t}^{\text{CB}} Y_j^{\text{CB,max}} \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{CB}} \quad (20)$$

2) 连续无功调节装置建模。以静态无功补偿装置(static VAR compensation, SVC)为例。相比离散无功补偿装置,连续无功调节相对简单。

$$Q_j^{\text{SVC,min}} \leq Q_{j,t}^{\text{SVC}} \leq Q_j^{\text{SVC,max}}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{SVC}} \quad (21)$$

式中: B^{SVC} 为包含 SVC 的节点集合; $Q_j^{\text{SVC},\min}$ 和 $Q_j^{\text{SVC},\max}$ 分别为 SVC 补偿功率的下限和上限。考虑到在主动配电网运行过程中, 随着光伏发电等 DG 的渗透率不断提高, 可能造成系统潮流反向, 出现过电压问题^[14], 因此本文 SVC 的补偿下限 $Q_j^{\text{SVC},\min} < 0$ 。

2.1.3 储能装置建模

通常情况下,储能装置需要考虑多时段的约束限制,主要包含充放电状态限制、充放电功率限制以及储能容量限制。

1) 充放电状态限制。

$$u_{j,t}^{\text{discharge}} + u_{j,t}^{\text{charge}} \leq 1, \quad \forall j \in B^{\text{ESS}}, \forall t \quad (22)$$

2) 功率极限。

$$\begin{cases} u_{j,t}^{\text{discharge}} P_j^{\text{discharge,min}} \leq P_{j,t}^{\text{discharge}} \leq u_{j,t}^{\text{discharge}} P_j^{\text{discharge,max}} \\ u_{j,t}^{\text{charge}} P_j^{\text{charge,min}} \leq P_{j,t}^{\text{charge}} \leq u_{j,t}^{\text{charge}} P_j^{\text{charge,max}} \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{ESS}} \quad (23)$$

3) 容量限制。

$$\begin{cases} E_{j,t+1}^{\text{ESS}} = E_{j,t}^{\text{ESS}} + \alpha_j^{\text{charge}} P_{j,t}^{\text{charge}} - \alpha_j^{\text{discharge}} P_{j,t}^{\text{discharge}} \\ E_j^{\text{ESS},\min} \leq E_{j,t}^{\text{ESS}} \leq E_j^{\text{ESS},\max} \end{cases}, \quad \forall j \in B^{\text{ESS}}, \forall t \quad (24)$$

式中: B^{ESS} 为包含 ESS 的节点集合; 式(22)表示同一时刻 ESS 不能同时充放电, $u_{j,t}^{\text{charge}}$ 和 $u_{j,t}^{\text{discharge}}$ 为 ESS 充电状态和放电状态; $P_j^{\text{charge,max}}$ 、 $P_j^{\text{discharge,max}}$ 、 $P_j^{\text{charge,min}}$ 和 $P_j^{\text{discharge,min}}$ 分别为 ESS 充放电功率上下限; $E_{j,t}^{\text{ESS}}$ 为 ESS 第 t 时段的电量, $E_j^{\text{ESS,max}}$ 和 $E_j^{\text{ESS,min}}$ 为考虑 ESS 寿命等因素的上下限值; α_j^{charge} 和 $\alpha_j^{\text{discharge}}$ 分别为充放电效率系数, 一般情况下, $0 < \alpha_j^{\text{charge}} < 1$ 、 $\alpha_j^{\text{discharge}} > 1$ 。

电动汽车作为一种新的主动管理手段,得到了广泛的研究^[21]。由于充放电功率也仅为有功功率,其基本模型与 ESS 基本类似,只是每个节点连接有大量的可控电动汽车,因此,对于配电网各母线节点的等效注入功率可表征为所有单个电动汽车的

聚类效果。

2.1.4 分布式电源建模

1) 不考虑无功的 DG 建模。

目前对 DG 的主动管理建模形式, 主要考虑 DG 能在一定情况下允许弃电, 且假设 DG 仅与有功出力有关^[21], 即:

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{DG}} \leq P_{j,t}^{\text{DG,PRE}}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{DG}} \quad (25)$$

式中: B^{DG} 为 DG 节点集合; $P_{j,t}^{\text{DG,PRE}}$ 为节点 j 在第 t 时段 DG 预测出力。

2) 考虑无功的 DG 建模。

在 DG 有功出力调节作为主要的主动管理方式研究成熟后, 再加上新的技术进步, 部分 DG 可以对电网有一定的无功影响, 包括输出无功和吸收无功, 因此, 在主动管理相关研究中, 开始出现对 DG 无功方面的主动管理研究, 其主要分为恒功率因数控制和可变功率因数控制。

①恒功率因数控制^[14]。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{DG}} \leq P_{j,t}^{\text{DG,PRE}} \\ Q_{j,t}^{\text{DG}} = F_j^{\text{DG}} P_{j,t}^{\text{DG}} \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{DG}} \quad (26)$$

②可变功率因数控制^[22]。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{DG}} \leq P_{j,t}^{\text{DG,PRE}} \\ Q_{j,t}^{\text{DG}} = F_j^{\text{DG}} P_{j,t}^{\text{DG}} \\ F_j^{\text{DG,min}} \leq F_j^{\text{DG}} \leq F_j^{\text{DG,max}} \\ Q_j^{\text{DG,min}} \leq Q_{j,t}^{\text{DG}} \leq Q_j^{\text{DG,max}} \end{cases}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{DG}} \quad (27)$$

式中: $F_j^{\text{DG,max}}$ 和 $F_j^{\text{DG,min}}$ 为 DG 变比调节上下限; F_j^{DG} 表示无功功率与有功功率的比值, 其优化范围可由功率因数控制范围转化而来, 目前大部分文献将无功功率限值 $Q_j^{\text{DG,min}}$ 和 $Q_j^{\text{DG,max}}$ 设置为常数^[22], 而在实际运行中, 其与有功出力、电压均存在一定的关系, 且不同类型的发电机特性均存在一定的差异, 该部分不是本文的重点, 不再赘述, 可参考文献[23-24]。

2.2 需求响应、综合负荷等建模

需求响应作为用户侧主动管理方式在很多文献中进行了研究, 如文献[2], 将需求响应分为基于电价的响应模式和基于激励的响应模式, 无论采用何种方式, 其对电网的作用仍可表征为节点注入功率的增量, 即:

$$Q_{j,t}^{\text{DR}} = \frac{Q_{j,t}^{\text{Load}}}{P_{j,t}^{\text{Load}}} P_{j,t}^{\text{DR}}, \quad \forall t, \forall j \in B^{\text{DR}} \quad (28)$$

上式为最简单的负荷响应与电网交互方式, 认为无功等比例变化于有功功率, 实际上, 无功需求也是一个较为复杂的问题, 本文不予讨论。 $P_{j,t}^{\text{Load}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{Load}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{DR}}$ 和 $Q_{j,t}^{\text{DR}}$ 分别为负荷需求和需求响应; B^{DR} 为需求响应节点集合。下面对支路潮流模型中考虑综合负荷进行相应的建模转化, 显然, 在负荷需求中, 传统仅考虑恒功率负荷情况的思想在技术日益进步, 精细化模拟日益迫切的阶段是不够准确的, 因此有必要构建电压静态特性下的综合负荷建模。由文献[16]可知, 负荷可采用 ZIP 模型, 分为恒功率模型、恒电流模型和恒阻抗模型。为表述的清晰性, 该节省略掉时段标识 t 。

$$\begin{cases} P_j^{\text{Load}} = P_{j,0}^{\text{load}} (\alpha_j^A \frac{V_j^2}{V_{j,0}^2} + \alpha_j^B \frac{V_j}{V_{j,0}} + \alpha_j^C) \\ Q_j^{\text{Load}} = Q_{j,0}^{\text{load}} (\alpha_j^A \frac{V_j^2}{V_{j,0}^2} + \alpha_j^B \frac{V_j}{V_{j,0}} + \alpha_j^C) \end{cases} \quad (29)$$

式中: α_j^A 、 α_j^B 和 α_j^C 为恒阻抗负荷、恒电流负荷和恒功率负荷比例; $P_{j,0}^{\text{load}}$ 、 $Q_{j,0}^{\text{load}}$ 为额定电压下的功率需求, 根据松弛模型转化, 改写为与电压平方 \tilde{V}_j 的关系式, 如下:

$$\begin{cases} P_j^{\text{Load}} = P_{j,0}^{\text{load}} (\alpha_j^A \frac{\tilde{V}_j}{\tilde{V}_{j,0}} + \alpha_j^B \frac{\sqrt{\tilde{V}_j}}{\sqrt{\tilde{V}_{j,0}}} + \alpha_j^C) \\ Q_j^{\text{Load}} = Q_{j,0}^{\text{load}} (\alpha_j^A \frac{\tilde{V}_j}{\tilde{V}_{j,0}} + \alpha_j^B \frac{\sqrt{\tilde{V}_j}}{\sqrt{\tilde{V}_{j,0}}} + \alpha_j^C) \end{cases} \quad (30)$$

针对恒电流负荷对应的 $\sqrt{\tilde{V}_j}$ 项, 由于电压标幺值在额定电压 1.0 附近, 则平方项也在额定值 1.0 附近, 设 $\tilde{V}_j = 1 + \Delta\tilde{V}_j$, $|\Delta\tilde{V}_j| < 1$, 且实际区间更小, 不超过 0.1。进行泰勒级数展开, 得:

$$\sqrt{\tilde{V}_j} = \sqrt{1 + \Delta\tilde{V}_j} = 1 + \frac{1}{2}\Delta\tilde{V}_j + o(\Delta\tilde{V}_j^2) \quad (31)$$

忽略上式高阶项, 则可近似为

$$\sqrt{\tilde{V}_j} \approx 1 + \frac{1}{2}\Delta\tilde{V}_j = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\tilde{V}_j \quad (32)$$

定义近似距离函数为

$$\Psi(\tilde{V}_j) = |\sqrt{\tilde{V}_j} - (\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\tilde{V}_j)| \quad (33)$$

图 2 为近似误差图, 可以看出, 误差范围较小, 为 10^{-3} 数量级, 完全满足优化要求。并采用 $\tilde{V}_{j,0} = \sqrt{\tilde{V}_{j,0}} = 1$ 替换, 得:

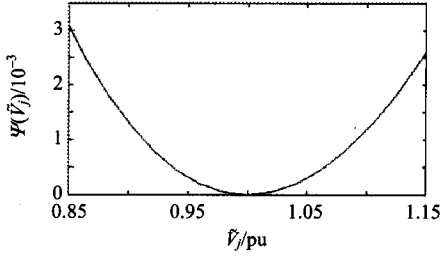


图2 近似误差曲线

Fig. 2 The error curve for approximation

$$\begin{cases} P_j^{\text{Load}} = (\alpha_j^A + \frac{\alpha_j^B}{2}) \tilde{V}_j P_{j,0}^{\text{load}} + (\frac{\alpha_j^B}{2} + \alpha_j^C) P_{j,0}^{\text{load}} \\ Q_j^{\text{Load}} = (\alpha_j^A + \frac{\alpha_j^B}{2}) \tilde{V}_j Q_{j,0}^{\text{load}} + (\frac{\alpha_j^B}{2} + \alpha_j^C) Q_{j,0}^{\text{load}} \end{cases} \quad (34)$$

若同时考虑负荷电压静态特性和需求响应, 则 $P_{j,0}^{\text{load}}$ 、 $Q_{j,0}^{\text{load}}$ 和 V_j 均为优化变量, 则上式右边第一项为双线性式, 可以采用分段线性化对 $P_{j,0}^{\text{load}}$ 和 $Q_{j,0}^{\text{load}}$ 进行处理^[25], 以 $P_{j,0}^{\text{load}}$ 为例进行说明。

假设将 $P_{j,0}^{\text{load}}$ 离散等分为 $S+1$ 部分, 则:

$$\Delta P_{j,0}^{\text{load}} = \frac{\bar{P}_{j,0}^{\text{load}} - \underline{P}_{j,0}^{\text{load}}}{S+1} \quad (35)$$

$$\begin{cases} \underline{P}_{j,0}^{\text{load}} + \sum_{s=1}^S \sigma_{j,s} \Delta P_{j,0}^{\text{load}} \leq P_{j,0}^{\text{load}} \leq \underline{P}_{j,0}^{\text{load}} + \Delta P_{j,0}^{\text{load}} + \sum_{s=1}^S \sigma_{j,s} \Delta P_{j,0}^{\text{load}} \\ \sigma_{j,s} \leq \sigma_{j,s-1} \end{cases}, \quad \forall j \in B^{\text{DR}}, s=2,3,\dots,S \quad (36)$$

式中: $\bar{P}_{j,0}^{\text{load}}$ 和 $\underline{P}_{j,0}^{\text{load}}$ 为需求响应负荷有功上下限; $\Delta P_{j,0}^{\text{load}}$ 为等份长度; $\sigma_{j,s}$ 为离散区间标识, 0-1 变量, 具有如下关系:

$$P_{j,0}^{\text{load}} > \underline{P}_{j,0}^{\text{load}} + s \Delta P_{j,0}^{\text{load}}, \quad \sigma_{j,s} = 1 \quad (37)$$

$$P_{j,0}^{\text{load}} = \underline{P}_{j,0}^{\text{load}} + \frac{1}{2} \Delta P_{j,0}^{\text{load}} + \sum_{s=1}^S \sigma_{j,s} \Delta P_{j,0}^{\text{load}} \quad (38)$$

式(38)仅最后一项包含变量 $\sigma_{j,s}$, 结合式(34), 仅需处理包含 $\sigma_{j,s} \tilde{V}_j$ 相关项, 由文献[19,26]知, 可采用 big-M 方法进行如下处理, 设 $\tilde{V}_{j,s} = \sigma_{j,s} \tilde{V}_j$, 则添加如下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \tilde{V}_j - \tilde{V}_{j,s} \leq M(1 - \sigma_{j,s}) \\ 0 \leq \tilde{V}_{j,s} \leq M \sigma_{j,s} \end{cases} \quad (39)$$

在实际应用中, 式(39)中 M 可取优化模型的电压上限值 \tilde{V}_j^{max} 。

2.3 辐射性及无孤岛限制约束建模

在强调网络灵活性的主动配电网环境下, 配电网重构不可或缺, 而辐射性及无孤岛约束限制是配电网优化运行过程中较为重要的约束条件。由于 BFM 模型在本质上对各支路的潮流流向正方向均作了预假设, 即: P_{ij} 表示潮流从 i 到 j , 若 $P_{ij} < 0$, 则实际潮流流向为从 j 到 i 。设 0-1 变量 σ_{ij} 表示支路 ij 的状态, 若 $\sigma_{ij,t} = 1$, 则支路 ij 开关处于闭合状态, 反之开关处于打开状态。若应用在配电网网架馈线规划过程中道理类似, 若 $\sigma_{ij,t} = 1$, 则候选支路 ij 被选择。基于此方法, 则原 SOCR-DOPF 模型需加以如下约束进行额外限制:

$$\begin{cases} P_{ij}^{\min} \sigma_{ij,t} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij}^{\max} \sigma_{ij,t} \\ Q_{ij}^{\min} \sigma_{ij,t} \leq Q_{ij,t} \leq Q_{ij}^{\max} \sigma_{ij,t}, \quad \forall ij \in E^{\text{SW}} \\ \tilde{I}_{ij}^{\min} \sigma_{ij,t} \leq \tilde{I}_{ij,t} \leq \tilde{I}_{ij}^{\max} \sigma_{ij,t} \end{cases} \quad (40)$$

$$\sum_{ij \in E \setminus E^{\text{SW}}} "1" + \sum_{ij \in E^{\text{SW}}} \sigma_{ij,t} = N^{\text{bus}} - N^{\text{sub}} \quad (41)$$

式(40)、(41)严格限制了支路上的潮流, 添加了上式约束后, 为必要非充分条件, 且潮流等式成立, 在一定程度上保证了负荷功率平衡, 在纯负载网络上上述条件能保证辐射性。然而在 DER 接入的主动配电网网络环境下, 仍可能导致环网或孤岛存在, 且孤岛和环网基本上同时出现, 因此只需加入连通性约束就能排除网络的孤岛情况。方法为对网络中所有非变电站的所有注入功率设为一个较小的正常量 ε , 并引入潮流约束中, 其保证了各节点与变电站节点的连通性。辅助方程如下:

$$\begin{cases} p_{j,t}^* = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,t}^* - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,t}^* - \tilde{I}_{ij,t}^* r_{ij}) + g_j \tilde{V}_{j,t}^* = \varepsilon \\ q_{j,t}^* = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,t}^* - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,t}^* - \tilde{I}_{ij,t}^* x_{ij}) + b_j \tilde{V}_{j,t}^* = \varepsilon, \\ \tilde{V}_{j,t}^* = \tilde{V}_{i,t}^* - 2(P_{ij,t}^* r_{ij} + Q_{ij,t}^* x_{ij}) + \tilde{I}_{ij,t}^* (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \end{cases} \quad \forall j \in B, \forall ij \in E \quad (42)$$

式(41)和式(42)保证了在网络的辐射性和连通性。此外, 也有文献对每条支路引入 2 个 0-1 变量来表征彼此的父子节点关系, 可参见文献[18,25]。本文的 BFM 模型本质上已定义好每条支路的首末节点关系, 因此未采用该方法。

当然, 在动态重构过程中, 开关调节次数也不可避免的受到限制, 类似于 OLTC 调节次数约束, 可进行如下建模:

$$\begin{cases} \delta_{ij,t}^{SW,IN} + \delta_{ij,t}^{SW,DE} \leq 1 \\ \sigma_{ij,t} - \sigma_{ij,t-1} \geq \delta_{ij,t}^{SW,IN} - \delta_{ij,t}^{SW,DE} \\ \sigma_{ij,t} - \sigma_{ij,t-1} \leq \delta_{ij,t}^{SW,IN} - \delta_{ij,t}^{SW,DE} \\ \sum_{t \in T} (\delta_{ij,t}^{SW,IN} + \delta_{ij,t}^{SW,DE}) \leq N_{ij}^{SW,max} \end{cases}, \forall t, \forall ij \in E^{SW} \quad (43)$$

式中： $\delta_{ij,t}^{SW,IN}$ 和 $\delta_{ij,t}^{SW,DE}$ 表示支路开关变化标识，为 0-1 变量，若 $\delta_{ij,t}^{SW,IN} = 1$ ，则开关在第 t 时段由打开状态变为闭合状态， $\delta_{ij,t}^{SW,DE}$ 类似； $N_{ij}^{SW,max}$ 为 T 时段内开关最大允许调节次数。

通过 2.1~2.3 节的线性建模处理后，各元素均能融入式(14)的基于二阶锥规划的动态最优潮流模型中。对于包含整数变量的混合整数二阶锥规划问题，目前采用商业优化也能较好求解。

3 有效性、准确性分析

本文采用了 BFM 模型，并对原非线性式进行了相应转化，文献[11,15]给出了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，并对几个高渗透 DG 网络进行了相应可行性验证。此外，BFM 模型在环网型结构中的准确性也得到了相应的研究^[8]，其主要区别在于相角逆变条件是否满足，而在主动配电网中，DG 等新元素即使工作在恒电压模式^[16]，也可处理为 PQ 节点，对角度转化无影响。此外，除了网络和约束条件能影响二阶锥松弛条件的准确性外，学者对 OPF 目标函数不同对优化结果的影响方面也作了一定的研究，文献[7,12,14]均提出了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，该结论也在文献[3]得到了印证。文献[3]对不同目标函数下的误差进行了对比分析，并提出了增加割集的方法保证模型可靠收敛。因此，二阶锥松弛方法在主动配电网环境下依然保持良好的收敛性和准确性，具有较强的实际应用价值。二阶锥松弛约束对最优潮流的准确性已符合要求。

除了二阶锥松弛外，辐射性、连通性约束等产生了较多 0-1 变量，影响了原模型的收敛性，但由于目前混合整数求解软件越来越成熟，且对 0-1 变量模型求解误差非常小。此外，2.2 节也采用了线性化近似，误差均较小。

4 应用实例

本文主要以 SOCR-DOPF 为基础进行了 3 个方面的扩展：1) 主动管理手段；2) 综合负荷模型；

3) 网络灵活性，即配电网重构。因此，以下将从这 3 方面进行校验分析。程序在 Matlab R2014a 环境下基于 CPLEX12.6.0 算法包进行计算，系统硬件环境为 i5-4200U CPU 1.6GHz，4GB 内存，操作系统为 Win10 64bit。

4.1 综合有功无功协调优化

4.1.1 算例介绍

本文采用改进的 PG69 节点算例进行分析，网络参数详见文献[19]。本文在基础网络上添加了 OLTC、ESS、CB、SVC 以及风机和光伏等元素，以全面验证各主动管理对象在 SOCR-DOPF 中的应用效果。假设 OLTC 变比范围为 $1 \pm 6\%$ ，其余主动管理设备参加详见附录 A1—A3。文献[3]已经证明在以网损为目标函数的松弛模型是严格准确的，除此之外，该算例添加了主网购电成本和风电、光伏弃电惩罚成本，以进行通用性校验，运行总成本 (C^{OPE}) 如式(44)，约束条件详见第 2 节。

$$\begin{aligned} C^{OPE} = & \sum_{t \in T} \Delta t [\sum_{ij \in E} c^{Loss} \tilde{I}_{ij,t} r_{ij} + \sum_{j \in B^{TR}} c^{TR} P_{j,t}^{TR} + \\ & \sum_{j \in B^{WTG}} c^{WTG} (P_{j,t}^{WTG,PRE} - P_{j,t}^{WTG}) + \\ & \sum_{j \in B^{PVG}} c^{PVG} (P_{j,t}^{PVG,PRE} - P_{j,t}^{PVG})] \end{aligned} \quad (44)$$

式中： c^{Loss} 、 c^{TR} 、 c^{WTG} 和 c^{PVG} 分别为网损价格、主网购电价格、风电弃电和光伏弃电惩罚价格； $P_{j,t}^{WTG}$ 和 $P_{j,t}^{PVG}$ 分别为风电和光伏预测出力。

4.1.2 算例结果

根据算例原始数据，进行有功协调优化得出各设备各时段结果，如图 3—5。图 3 为负荷和 DG 的有功出力值，图 4 为主网有功出力和 ESS 充放电功率曲线，图 5 为无功出力图。

从图 3—5 可以看出：1) 在负荷低谷时段 (02:00—10:00)，由于需保证主网 0.5MW 的出力下限值，而 ESS 受到容量的限制，无法进一步吸收多余的清洁能源，导致弃电情况的发生，且 ESS 在负

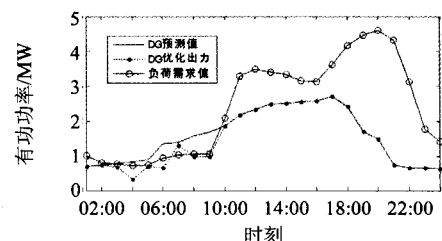


图 3 负荷和 DG 出力曲线

Fig. 3 Curve for load demand and DG output

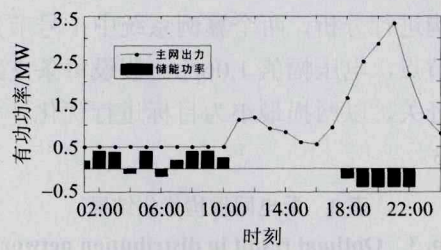


图 4 主网有功出力和 ESS 充放电功率曲线
Fig. 4 Active power curve for upper grid and ESS

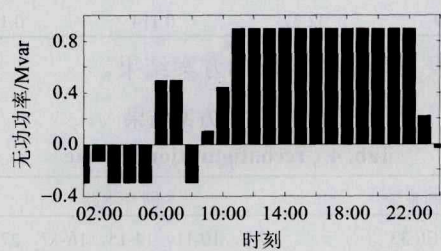


图 5 系统总无功出力图
Fig. 5 Total reactive power output diagram in the system

荷高峰阶段进行放电，有效降低了等效负荷峰谷差；2) 在 DG 出力占负荷比例相对较高的时段(夜间时段)，无功装置吸收系统多余无功，从而避免过电压的出现。因此，基于 SOCR-DOPF 模型对有功和无功的优化均有明显效果。

4.1.3 有效性分析

1) 松弛准确性分析。该模型仅在二阶锥方面进行了松弛近似，仅验证二阶锥松弛准确性。对在纯负载网络环境下以网损和主网出力为目标函数的松弛准确性在文献[3,7-8]均已得到证明和验证，而为分析增加弃电和失负荷惩罚成本后的模型准确性，定义误差指标 $\Delta_{ij,s,t}^{\text{diff}}$ ：

$$\Delta_{ij,t}^{\text{diff}} = |P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 - \tilde{I}_{ij,t} \tilde{U}_{j,t}| \tag{45}$$

图 6 为各时段各支路下的误差散点图。显然，松弛后的偏差满足运行要求，为 10^{-6} 量级。

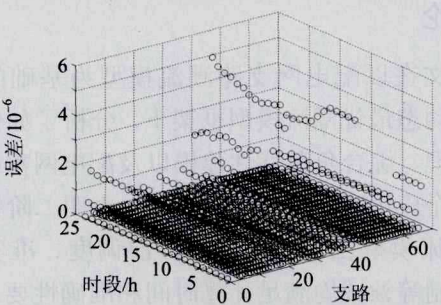


图 6 各时段各支路下的误差散点图
Fig. 6 Error scatter under different periods and branches

2) 计算速度分析。下表为不同目标函数下的求解速度和对应模拟运行结果。其中，各模拟运行工况的目标函数 Case1：网损最小；Case2：主网购电最小；Case3：网损和主网购电最小；Case4：网损、主网购电和弃电最小。具体见表 1。

表 1 不同目标函数下的优化结果

Tab. 1 Optimal results under different objectives				
类别	时间/s	成本/(10 ³ \$)		
		网损	主网购电	弃电
Case1	22.03	4.209	62.341	33.808
Case2	24.73	5.951	47.867	0.115
Case3	51.17	4.361	47.869	1.712
Case4	60.80	5.988	47.869	0.086

从上表可知，随着目标函数的增加，计算时间不断增大，但计算速度仍可接受，最大为 60.80s，均满足配电网主动运行的日前调度、准实时优化等要求。此外，对于 Case4，不同算法的对比分析如表 2。传统协调优化模型实质为混合整数非线性规划问题(MINLP)，其求解方法主要为智能方法和传统的数值方法，本文以遗传算法和 Bonmin 优化包为例进行对比。不难发现，直接求解 MINLP 均较为困难或耗时较长，而转化为 MISOCP 后，求解速度大大提高。

表 2 不同算法下的求解信息对比

Tab. 2 Comparison for solution information under different algorithms		
模型类型	求解算法	计算时间
MISOCP	CPLEX	60.80s
MINLP	遗传算法	> 30min
MINLP	Bonmin	Infeasible

3) 不同目标函数的优化对比。从表 1 可观察到：①Case1 由于仅考虑网损最优，存在较多的清洁能源弃电现象，而 Case2 以主网购电最小为目标函数，需要更多的消纳清洁能源，从而降低主网购电量，因此弃电量也相应有所减少；②Case3 以网损和主网购电最小为统一优化目标，主网购电量保持相当，而网损降低，且弃风量相应增加，本文假设网损成本和弃电惩罚成本相等，均为 5000\$/MWh，因此说明清洁能源的接入的过多接入可能会增加系统的网络损耗；③Case4 以网损、主网购电和弃电最小为目标，主网购电依然保持相当，而弃电量相应降低，网损增大，说明增大清洁能源接入引起的网损小于清洁能源弃电惩罚，因此弃电量进一步降低。

4.2 综合负荷应用

该应用实例采用 PG69 节点系统测试，参数见 4.1 节，为测试负荷的静态电压特性，该部分未考虑 AM 设备，仅分析引用负荷静态电压特性后的计算结果。为简化分析，假设各节点仅包含一种类别负荷，详细情况见附录 A4，计算各节点各时段电压分布如图 7。图 8 为考虑电压静态特性与否的负荷有功需求对比。

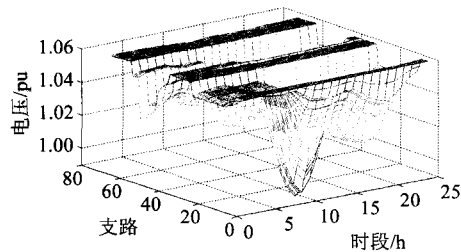


图 7 电压分布图

Fig. 7 Voltage distribution

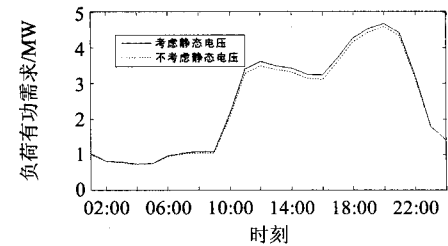


图 8 考虑电压静态特性与否的负荷有功需求对比

Fig. 8 Comparison for load demand with/without voltage-dependent charictoristic considered

从图 7 和图 8 可以看出：由于节点电压大部分高于 1.0pu，考虑负荷静态电压特性后，负荷需求相应提高。此外各时段的二阶锥松弛误差如图 9。显然，松弛效果也非常满意，考虑静态电压特性主动配电网精细化模拟具有重要意义。

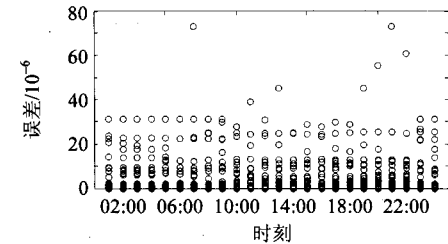


图 9 综合负荷模型误差散点图

Fig. 9 Error scatter in ZIP load model analysis

4.3 配电网重构

配电网重构实例以标准 IEEE 33 和 PG69 系统进行分析，负荷值为原系统数据。为校验二阶锥松弛的在配电网重构中的有效性，该实例采用静态单

时段重构进行分析，两个算例系统中 1 号节点均为变电站节点，电压幅值 1.06pu。假设每条支路均装设分段开关，以网损最小为目标进行优化计算，结果如表 3。

表 3 配电网重构优化结果

Tab. 3 Optimal result in distribution network reconfiguration

算例系统	计算时间/s	网损值/MW	原网损值/MW
IEEE 33	3.83	0.136	0.177
PG69	32.27	0.114	0.198

下表 4 为两系统重构方案结果。

表 4 重构方案结果

Tab. 4 reconfiguration scheme

算例系统	断开支路
IEEE 33	7-8, 10-11, 14-15, 16-17, 27-28
PG69	14-15, 19-20, 24-25, 47-48, 11-66

同样采用 4.1.3 节的误差指标得出各支路的误差散点图，如图 10。

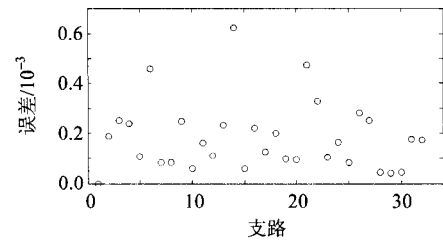


图 10 配电网重构误差散点图

Fig. 10 Error scatter for distritution network reconfiguration

不难发现，误差为 10^{-4} 数量级，满足重构要求。值得说明的是在本算例中，未加入 DG、AM 设备等，对于 IEEE 33 节点，所有节点均有负荷值，因此在辐射性约束中仅添加式(41)即可，而对于 PG69 系统中部分节点无负荷，为保证所有节点连通且无孤岛辐射状运行，必须增加式(42)进行约束。

5 结论

本文在以配电网支路潮流模型为基础的二阶锥松弛动态最优潮流模型框架下，分析了如何融入主动管理、综合负荷特性建模以及配电网重构，并通过 3 个应用实例进行验证分析，表明二阶锥松弛最优潮流模型在主动配电网日前调度、准实时运行、控制等领域均满足计算时间和准确性要求，具有较强的实际应用价值，且考虑综合负荷模型对主动配电网精细化模拟也具有重要意义。从应用的角

度验证了该模型的有效性, 但引入离散变量这一非凸源对松弛模型的准确性影响, 以及二阶锥松弛模型自身准确的普适性条件需从理论上加以进一步研究, 是作者下一步的努力方向。

参考文献

- [1] Ferreira R S, Borges C L T, Pereira M V F. A flexible mixed-integer linear programming approach to the AC optimal power flow in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2447-2459.
- [2] Liu Junyong, Gao Hongjun, Ma Zhao, et al. Review and prospect of active distribution system planning[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 457-467.
- [3] 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.
- [4] Ela A A A E, Abido M A, Spea S R. Optimal power flow using differential evolution algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(7): 878-885.
- [5] Niknam T, Narimani M R, Aghaei J, et al. Improved particle swarm optimisation for multi-objective optimal power flow considering the cost, loss, emission and voltage stability index[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(6): 515-527.
- [6] Martins V F, Borges C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
- [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] Farivar M, Low S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part II[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2565-2572.
- [9] 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.
- [10] Farivar M, Clarke C R, Low S H, et al. Inverter VAR control for distribution systems with renewables[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Brussels: IEEE, 2011: 457-462.
- [11] Li Na, Chen Lijun, Low S H. Exact convex relaxation of OPF for radial networks using branch flow model[C]// Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Smart Grid Communications. Tainan: IEEE, 2012: 7-12.
- [12] 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.
- [13] Low S H. Convex relaxation of optimal power flow-part II: exactness[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1(2): 177-189.
- [14] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
Liu Yibing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583(in Chinese).
- [15] 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.
- [16] Garces A. A quadratic approximation for the optimal power flow in power distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 130: 222-229.
- [17] Peng Qiuyu, Tang Yujie, Low S H. Feeder reconfiguration in distribution networks based on convex relaxation of OPF[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1793-1804.
- [18] Taylor J A, Hover F S. Convex models of distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1407-1413.
- [19] Ding Tao, Liu Shiyu, Yuan Wei, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301-311.
- [20] Nick M, Cherkaoui R, Paolone M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2300-2310.
- [21] Xiang Yue, Liu Junyong, Liu Yong. Optimal active distribution system management considering aggregated plug-in electric vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 131: 105-115.
- [22] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
Xing Haijun, Cheng Haozhong, Zhang Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510(in Chinese).

[23] Rueda-Medina A C, Franco J F, Rider M J, et al. A mixed-integer linear programming approach for optimal type, size and allocation of distributed generation in radial distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 97: 133-143.

[24] Zou Kai, Agalgaonkar A P, Muttaqi K M, et al. Distribution system planning with Incorporating DG reactive capability and system uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 112-123.

[25] Gonçalves R R, Franco J F, Rider M J. Short-term expansion planning of radial electrical distribution systems using mixed-integer linear programming[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(3): 256-266.

[26] 李洪美, 崔翰韬, 万秋兰. 考虑电动汽车充电策略的配网重构二阶锥规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4674-4681.

Li Hongmei, Cui Hantao, Wan Qiulan. Distribution network reconfiguration based on second-order conic programming considering EV charging strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4674-4681(in Chinese).

附录 A

表 A1 CB 参数

Tab. A1 Parameters of CB

接入节点	单位容量/Mvar	数量
19、36、41、53、64	0.05	5

表 A2 ESS 参数

Tab. A2 Parameters of ESS

接入节点	功率极限/MW	容量极限/(MW·h)	充电效率	放电效率
2	0.3	1.5	0.9	1.11
12	0.1	0.5	0.9	1.11

表 A3 SVC 参数

Tab. A3 Parameters of SVC

接入节点	补偿范围
3	[-0.2, 0.6]
11	[-0.1, 0.3]

表 A4 各节点负荷类型

Tab. A4 Load type

负荷类别	接入节点
恒功率	1-15, 42-54
恒电流	16-27, 36-41, 55-58
恒阻抗	28-35, 59-69



高红均

收稿日期: 2016-01-05。

作者简介:

高红均(1989), 男, 博士研究生, 研究方向为主动配电网规划, e-gaohongjun@163.com;

刘俊勇(1963), 男, 博士生导师, 研究方向为配电网规划运行及电力市场研究;

沈晓东(1975), 男, 博士, 讲师, 研究方向为配电网规划运行, shengxd@scu.edu.cn。

(编辑 邱丽萍)