

Economic Scheduling Model Considering Different Kinds of New Energy Sources and Efficient Optimization Algorithm Based on QCQP Modeling

Tieqiang Wang¹, Guanghui Sun¹, Xin Cao¹, Shaoqing Guo², Deliang Zhang², Honghui Kuang²

¹Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang Hebei

²Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing

Email: wtq@he.sgcc.com.cn, hebeisd@126.com

Received: Dec. 11th, 2015; accepted: Dec. 24th, 2015; published: Dec. 31st, 2015

Copyright © 2015 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

Abstract

It is a trend that more and more wind power, photovoltaic and battery storage is integrated into the power grid. Because of the differences between the new energy and traditional one, the original economic model is hard to cover the need of power dispatching. The operation features of the new energy are analyzed in this paper. And an economic scheduling model considering different kinds of energy sources is proposed. By introducing DisFlow power formula, this model can be solved more easily in the way of QCQP algorithm.

Keywords

Different Kinds of New Energy Sources, Large Power Grid, Economic Scheduling

多种电源形式下大电网经济调度模型与基于QCQP建模的高效优化算法研究

王铁强¹, 孙广辉¹, 曹欣¹, 郭少青², 张德亮², 匡洪辉²

¹河北省电力公司, 河北 石家庄

文章引用: 王铁强, 孙广辉, 曹欣, 郭少青, 张德亮, 匡洪辉. 多种电源形式下大电网经济调度模型与基于QCQP建模的高效优化算法研究[J]. 智能电网, 2015, 5(6): 336-346. <http://dx.doi.org/10.12677/sg.2015.56041>

²北京清大科越科技有限公司, 北京
Email: wtq@he.sgcc.com.cn, hebeisd@126.com

收稿日期: 2015年12月11日; 录用日期: 2015年12月24日; 发布日期: 2015年12月31日

摘要

风电、光伏、储能等新电源形式接入大电网, 已成为电网发展的必然趋势。由于上述新型电源与传统水火电运行控制特性上的根本差别, 传统经济调度模型与方法已经不能适应多种电源形式下的分析使用需要。为此本文通过深入分析新型电源运行特性, 提出了多种电源形式下大电网经济调度模型, 并通过引入DisFlow潮流式, 将上述问题简化, 提出了QCQP快速算法, 能够实现对上述问题的高效高精度求解。

关键词

多种电源, 大电网, 经济调度

1. 引言

随着风电、光伏等分布式发电设备, 储能装置, 互动负荷等新型能源在电网中的广泛应用, 多种能源形式接入已成为现代电力系统电网发展的必然趋势。作为大电网运行优化的核心, 其运行优化模型与算法对协调不同类型能源的运行方式, 保证电网安全可靠运行, 提升电网综合运行效益具有十分重要的作用。

传统的电网运行研究, 主要集中于调度运行计划。由于传统电源, 如火电、水电无功电压控制能力较强, 因此在传统调度计划分析中往往不考虑无功电压对电网运行的影响。然而随着新型电源的大量接入, 首先由于新型电源的运行模式与传统电源存在根本不同, 其次新型电源无功电压支撑能力相比传统水火电较弱。因此传统的经济调度计划模型与算法难以适应新型电源大量接入情况下电网调度运行的实际要求[1]-[3]。

文献[4]最早提出了电网中的调度计划问题, 文中系统阐述了电网中考虑分布式电源、储能装置等设备进行调度计划编制的重要性, 同时总结了电网调度计划编制中应该关注的控制手段。早期电网调度计划的研究方法类似与输电网的调度计划方法, 直流潮流成为电网调度计划模型的基础。节点电压是配电网安全运行的重要方面, 但是直流潮流无法考虑系统电压的限制, 利用该模型不能保证系统节点电压稳定[5]。因此, 越来越多的电网调度计划模型以交流潮流为基础, 考虑节点电压和支路潮流约束。文献[6][7]所提出的调度计划模型以交流潮流为基础, 考虑了节点电压、线路潮流限制。文献[8]提出了两阶段的电网调度计划编制模式, 第一阶段为日前计划编制期, 以直流潮流为基础, 考虑储能、风电、光伏、燃气轮机等不同设备有功出力约束, 对次日的系统有功出力进行规划。第二阶段是日内计划编制, 设计了单时段的调度计划模型, 该模型以交流潮流为基础, 通过对潮流计算和出力优化两个子问题反复迭代进行求解。其中出力优化是在交流潮流局部线性化的基础上, 考虑分布式电源、储能装置等出力限制, 节点电压限制等限制。

本文首先全面研究分析了多种电源的运行特性, 在此基础上提出了多种电源接入下大电网经济调度模型。然后基于 QCQP 模型特点, 引入简化的 DisFlow 潮流工具, 将上述复杂优化模型转化为 QCQP 建模模型, 并通过迭代求解算法实现了对上述问题的高精度求解。最后基于 REDS-135 节点算例对本文算法的效率和精度进行了验证。

2. 多种电源形式下大电网经济调度模型

2.1. 新型电源运行特性

传统的水电、火电运行特性已经得到了广泛的研究，然而近年来风电、光伏、储能等新型电源大量接入，负荷侧响应模式日新月异，成为电网调度运行面临的新挑战。其中分布式发电设备主要包括风电机组、光伏机组、燃气轮机三类；储能装置包括超导储能，飞轮储能，化学电池储能等；需求侧响应主要通过电网公司与用户签订使用协议进行控制，削峰型和移峰型互动负荷是需求侧响应两种主要形式也是本文建模中所考虑的需求侧响应类型。

与传统的大型火电、水电机组不同，分布式发电设备往往是通过电力电子变换装置与电网连接，其出力特性很大程度上取决于电力电子装置的元件类型、组织结构和控制策略。目前，分布式发电设备的电力电子装置主要采用恒功率因数和恒电压两种控制模式。分布式发电设备主要包括风电机组、光伏机组与燃气轮机三类。

从储能方式上，储能装置包括化学电池储能、飞轮储能、超导储能等。但是从并网储能装置的拓扑结构来看，上述不同类型的储能装置具有相同的拓扑结构。

按照对系统负荷曲线的影响，用户侧互动负荷可分为削峰、移峰两类。如图 1 和图 2 所示，削峰和移峰的核心理念均是降低高峰时段系统的负荷电量。但是削峰方式下，高峰时段削减的电量在低谷时段不会进行补偿；然而移峰方式下，高峰时段削减的电量会在低谷时段进行等量补偿，维持系统总用电量不变。由于削峰方式容易造成系统负荷在其他时段不可控的电量恢复现象，相比之下移峰方式的电力负荷可控性更强，因此在本文将重点考虑移峰方式下的用户侧互动负荷。

结合多时段协调的大电网运行优化建模的实际需求，本文将从灵活运行特性、时段间协调特性、有功-无功协调关系三个方面对其运行特征进行描述，如表 1 所述。灵活运行特性是对分布式能源出力范围的描述；时段间协调特性是多时段优化过程中对分布式能源时段间出力关系的约束限制；考虑到电网优化问题必须考虑系统的无功情况，因此还有必要分析分布式能源的有功-无功协调关系。以上三方面约束，是多时段大电网运行优化模型中对分布式能源分析所需要考虑的特性关系。

上式中， $P_{i,j}^W$ 、 $P_{i,j}^P$ 和 $P_{i,j}^G$ 分别表示风电机组、光伏机组、燃气轮机在时段 i 的有功功率。 $P_{i,j}^{W,av1}$ 、 $P_{i,j}^{P,av1}$ 表示风电机组、光伏机组在时段 i 的有功最大出力限制。 \bar{P}_j^G 和 \underline{P}_j^G 代表燃气轮机在时段 i 的有功出力上下限范围。 $P_j^{G,RD}$ 和 $P_j^{G,RU}$ 分别表示燃气轮机上爬坡和下爬坡的出力变化约束。 $Q_{i,j}^d$ 表示分布式发电设备在时段 i 的无功出力， \bar{Q}_j^d 和 \underline{Q}_j^d 分别表示无功出力的上下限。 $P_{i,j}^d$ 表示分布式发电设备的有功出力。 $C_j^{d,Pset}$ 为恒功率因数控制模式下的功率因数设定值。 $V_j^{d,Vset}$ 表示恒电压控制模式下节点电压的设定值。 P_s 和 Q_s 分别表示储能装置放电的有功与无功， ϕ 为相应的功率因数角。 $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 用于代表储能装置 i 在时段 j 的运行状态，(1,0)表示储能装置处于储能状态，(0,1)表示储能装置处于放电状态，(0,0)表示储能装置未与电网发生电能交换，由于设定了 0-1 变量 $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 之和小于 1，则能保证储能装置在任何时刻仅处于上述一种运行状态。和表示储能装置在储能状态下的储电量和放电状态下的放电量。 $P_{i,j}^{sC}$ 和 $\bar{P}_{i,j}^{sC}$ 为储能阶段储能装置的储电量上下限， $P_{i,j}^{sD}$ 和 $\bar{P}_{i,j}^{sD}$ 为储能装置放电阶段放电量的上下限。

2.2. 多种电源形式下大电网经济调度模型

为系统描述系统中相关设备的运行状态，本文提出的优化模型既包含用于描述根节点、分布式发电设备、储能装置和互动负荷出力有功和无功量的连续变量，也包含用于描述储能装置和互动负荷运行状态的 0-1 变量。需要特别说明的是，储能装置存在充电和放电两个状态，因此需要用两组变量描述其状态。

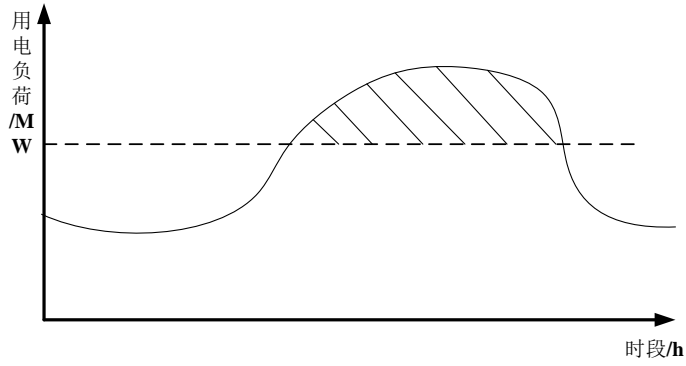


Figure 1. Peak clipping type load
图 1. 削峰类型负荷

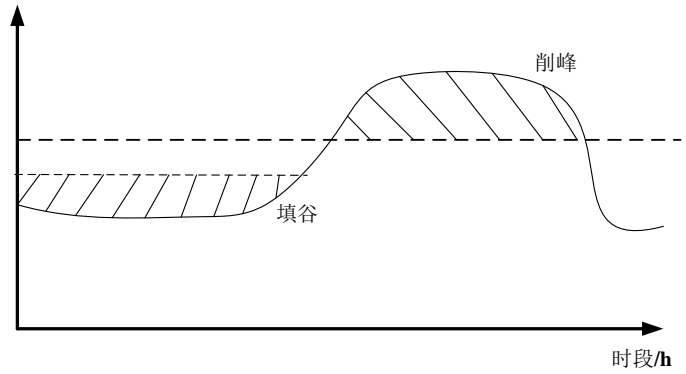


Figure 2. Peak shift type load
图 2. 移峰类型负荷

Table 1. Operating characteristic summary table
表 1. 运行特性汇总表

项目	灵活运行特性	时段间协调特性	有功 - 无功协调特性
分布式发电设备	$\begin{cases} P_{i,j}^w \leq P_{i,j}^{w,avl} \\ P_{i,j}^p \leq P_{i,j}^{p,avl} \\ P_{i,j}^g \leq P_{i,j}^g \leq \bar{P}_{i,j}^g \end{cases}$	$P_j^{G,RD} \leq P_{i+1,j}^G - P_{i,j}^G \leq P_j^{G,RU}$	$\begin{cases} \underline{Q}_j^d \leq Q_j^d \leq \bar{Q}_j^d \\ CPF: Q_j^d = C_j^{d,Psset} \times P_{i,j}^d \\ CV: V = V_j^{d,Vset} \end{cases}$
储能装置	$\begin{cases} a_{i,j}, b_{i,j} \in \{0,1\} \\ a_{i,j} + b_{i,j} \leq 1 \\ a_{i,j} \cdot P_{i,j}^{sC} \leq P_{i,j}^{sC} \leq a_{i,j} \cdot \bar{P}_{i,j}^{sC} \\ b_{i,j} \cdot P_{i,j}^{sD} \leq P_{i,j}^{sD} \leq b_{i,j} \cdot \bar{P}_{i,j}^{sD} \end{cases}$	$P_j^s \leq P_j^{s,I} + \sum_{n=1}^j (P_{n,j}^{sC} - P_{n,j}^{sD}) \leq \bar{P}_j^s$	$\begin{cases} CP: Q_{i,j}^{sC} = 0 \\ \underline{Q}_{i,j}^{sD} \leq Q_{i,j}^{sD} \leq \bar{Q}_{i,j}^{sD} \\ DP: \begin{cases} CPF: Q_{i,j}^{sD} = C_j^{sD} \times P_{i,j}^{sD} \\ CV: V = V_j^{s,Vset} \end{cases} \end{cases}$
互动负荷	$\begin{cases} ZX: u_{i,j}^{ZX} = \sum_{m=1}^{N_i^{ZX}} I_i^{ZX,m} P_{i,j}^{ZX,m} \\ PY: u_{i,j}^{PY} = \sum_{m=1}^{T_j} I_{i,j-m+1}^{PY} P_{i,m}^{PY} \end{cases}$	$\begin{cases} \sum_{m=1}^{N_i^{ZX}} I_i^{ZX,m} = 1 \\ \sum_{m=1}^T I_{i,j}^{PY} = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} Q_{i,j}^{ZD,d} = P_{i,j}^{ZD,d} / C_j^{ZD} \\ \eta_{i,j}^{ZD} = u_{i,j}^{ZD} / C_j^{ZD} \\ Q_{i,j}^{PD,d} = P_{i,j}^{PD,d} / C_j^{PD} \\ \eta_{i,j}^{PD} = u_{i,j}^{PD} / C_j^{PD} \end{cases}$

综上所述，本文提出的大电网经济调度优化模型中决策变量包括：

- 1) 连续变量： P_i^s 、 Q_i^s 、 $P_{i,j}^d$ 、 $Q_{i,j}^d$ 、 $P_{i,j}^{sC}$ 、 $P_{i,j}^{sD}$ 、 $Q_{i,j}^{sC}$ 、 $Q_{i,j}^{sD}$ 、 $P_{i,j}^{ZD,d}$ 、 $Q_{i,j}^{ZD,d}$ 、 $P_{i,j}^{PD,d}$ 、 $Q_{i,j}^{PD,d}$ 、 $u_{i,j}^{ZD}$ 、 $\eta_{i,j}^{ZD}$ 、 $u_{i,j}^{PD}$ 、 $\eta_{i,j}^{PD}$

其中, P_i^s 和 Q_i^s 分别表示大电网平衡节点在时段的有功和无功注入量, 其余决策变量的含义如上分布式能源运行特性一节中所述。

2) 0-1 状态变量: $a_{i,j}$ 、 $b_{i,j}$ 、 $I_{i,j}^{ZD}$ 、 $I_{i,j}^{PD}$

上述 0-1 状态变量中, $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 用于描述储能装置的运行状态, $I_{i,j}^{ZD}$ 和 $I_{i,j}^{PD}$ 用于描述移峰型互动负荷的运行状态, 具体的含义如上一节所述。

本文的优化目标设定为系统全时段运行的成本最低, 考虑根节点、分布式发电设备、储能设备和可控负荷四方面运行效益。

$$\begin{aligned} \text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^T (\lambda_i^{s,P} P_i^s + \lambda_i^{s,Q} Q_i^s) + \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^T (\lambda_{i,j}^{d,P} P_{i,j}^d + \lambda_{i,j}^{d,Q} Q_{i,j}^d) + \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^T (\lambda_{i,j}^{sD,P} P_{i,j}^{sD} + \lambda_{i,j}^{sD,Q} Q_{i,j}^{sD}) \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^{NC} \sum_{t=1}^{T_j} \left(C_{\text{shift}}(t) \times L_{s1}(t) + \sum_{t=T_j}^T C_{\text{shift}}(t) \times L_{s2}(t) \right) \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

如上式, λ 代表不同设备的价格系数, 用其上标中的前半段区分不同类型设备, s , d , sD 分别表示根节点、分布式发电设备、储能装置, 用其后半段区分其有功或者无功, P 和 Q 分别代表有功、无功; 用其下标区分设备的编号和不同时段, i, j 表示处于时段 j 某种类型分布式能源第 i 个设备。

系统运行约束需要考虑系统运行和设备特性两方面约束条件, 下面分别进行介绍。

1) 系统运行约束

系统运行约束, 包括功率平衡方程、线路潮流约束和节点电压约束, 是对电网基本运行约束的规范。

2) 设备特性约束

设备特性约束, 是基于分布式能源的实际运行特点规定的设备运行特性方程, 以保证分布式能源的运行满足其自身运行性质要求。如上一节中对分布式发电设备、储能装置、互动负荷的运行性质分析, 这里的特性约束也将主要考虑这三类分布式能源的灵活运行约束、时段间协调约束、有功 - 无功协调约束。

3. 基于 QCQP 的建模方法

3.1. QCQP 模型简介

Quadratically Constrained Quadratic Program (二次约束二次规划问题, QCQP), 是目标和约束项中均含有二次形式的规划问题。其基本形式如下:

$$\begin{aligned} \text{minimize: } & \frac{1}{2} x^T P_0 x + q_0^T x \\ \text{subject to: } & \frac{1}{2} x^T P_i x + q_i^T x \leq 0 \\ & Ax = b \\ \text{for } & i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (2)$$

如上式, x 为决策变量的列向量, x^T 为其转置。 P_0 至 P_m 为 $n \times n$ 系数矩阵, q_0 至 q_m 为 $n \times 1$ 系数矩阵。 A 为 $n \times n$ 系数矩阵, b 为 $n \times 1$ 系数矩阵。

需要特别说明的是, QCQP 规划需要保证系数矩阵 P_0 至 P_m 均为正定矩阵。否则不能确保上述问题为凸规划。如果上述问题中, 系数矩阵 P_0 至 P_m 为零矩阵, 则该问题转化为普通的线性规划问题。

3.2. 基于 Distflow 潮流的模型转化方法

DistFlow 法是在 1989 年由学者 Baran 等人提出的电网潮流计算关系式, 形式如下:

$$\begin{cases}
P_{i,m}^l = P_{ji,m}^{line} - P_{ji,m}^{loss} - \sum_{j(i,j) \in W} P_{ij,m}^{line} \\
Q_{i,m}^l = Q_{ji,m}^{line} - Q_{ji,m}^{loss} - \sum_{j(i,j) \in W} Q_{ij,m}^{line} \\
V_j^{m2} = V_i^{m2} - 2 \times (r_{ij} P_{ij,m}^{line} + x_{ij} Q_{ij,m}^{line}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \times (P_{ij,m}^{line2} + Q_{ij,m}^{line2}) / V_i^{m2} \\
P_{ij,m}^{loss} = (P_{ji,m}^{line2} + Q_{ji,m}^{line2}) / V_i^{m2} \times r_{ij} \\
Q_{ij,m}^{loss} = (P_{ji,m}^{line2} + Q_{ji,m}^{line2}) / V_i^{m2} \times x_{ij}
\end{cases} \quad (3)$$

上式(2)中, 首先需要对线路传输模型进行简化, 忽略其中线路容抗, 设定线路的阻抗为 $r_{ij} + jx_{ij}$, 线路首端的节点电压为 V_i , 末端节点电压为 V_j , 相应的电压幅值分别为 V_i 和 V_j 。由节点 i 流向节点 j 的潮流为 $P_i + jQ_i$ 。

将式(2)代入多种电源接入下大电网经济调度模型, 可将其转化为含非凸二次约束项的优化问题, 即 SOCP 问题。然而受限于当前优化计算水平, 尚不具备对该问题的高效求解算法。将新问题的非凸二次约束项列写如下:

$$\begin{cases}
V_i^{m2} V_i^{m2} + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \times (P_{ji,m}^{line2} + Q_{ji,m}^{line2}) \leq V_i^{m2} V_j^{m2} + 2 \times V_i^{m2} (r_{ij} P_{ji,m}^{line} + x_{ij} Q_{ji,m}^{line}) \\
r_{ij} P_{ji,m}^{line2} + r_{ij} Q_{ji,m}^{line2} \leq P_{ij,m}^{loss} V_i^{m2} \\
x_{ij} P_{ji,m}^{line2} + x_{ij} Q_{ji,m}^{line2} \leq Q_{ij,m}^{loss} V_i^{m2}
\end{cases} \quad (4)$$

可以发现节点电压项是上述非凸二次约束中的关键环节, 固化节点电压项, 忽略优化过程中电压幅值的细微变化, 则(4-2)式中的三项非凸二次约束项, 第一式电压关系式可以删除, 第二和第三线路损耗关系式可转化为凸二次约束的形式, 从而实现了上述问题中非凸二次约束的“凸化”。

3.3. 基于 QCQP 的大电网经济调度模型

按照上述模型转化思路, 固定模型中的电压幅值项, 可将此模型进一步转化为 QCQP 问题。

所得的基于 QCQP 的优化模型, 最大的优势在于系统运行约束项上, 由于电压幅值固定, 因此系统运行约束中节点电压关系式和节点电压范围约束式不再需要考虑; 同时线路网损关系式将变为凸二次约束式。模型的目标项和分布式发电设备、储能装置、互动负荷运行特性约束形式不会改变。新的优化模型, 其系统运行约束如下:

$$\begin{cases}
\sum_{DG=1}^{NG^i} P_{DG,m}^d + \sum_{SD=1}^{NS^i} P_{SD,m}^{sD} - \sum_{SD=1}^{NS^i} P_{SD,m}^{sC} + \sum_{ZD=1}^{NZD^i} u_{ZD,m}^{ZD} + \sum_{PD=1}^{NPD^i} u_{PD,m}^D - \sum_{ZD=1}^{NZD^i} P_{ZD,m}^{ZD,d} - \sum_{PD=1}^{NPD^i} P_{PD,m}^{PD,d} - P_{i,m}^l \\
= \sum_{j(i,j) \in W} P_{ij,m}^{line} - P_{ji,m}^{line} + P_{ji,m}^{loss} \\
\sum_{DG=1}^{NG^i} Q_{DG,m}^d + \sum_{SD=1}^{NS^i} Q_{SD,m}^{sD} - \sum_{SD=1}^{NS^i} Q_{SD,m}^{sC} + \sum_{ZD=1}^{NZD^i} \eta_{ZD,m}^{ZD} + \sum_{PD=1}^{NPD^i} \eta_{PD,m}^D - \sum_{ZD=1}^{NZD^i} Q_{ZD,m}^{ZD,d} - \sum_{PD=1}^{NPD^i} Q_{PD,m}^{PD,d} - Q_{i,m}^l \\
= \sum_{j(i,j) \in W} Q_{ij,m}^{line} - Q_{ji,m}^{line} + Q_{ji,m}^{loss} \\
P_{ij,m}^{line2} + Q_{ij,m}^{line2} \leq S_{ij}^{f2} \\
r_{ij} P_{ji,m}^{line2} + r_{ij} Q_{ji,m}^{line2} - P_{ij,m}^{loss} V_i^{m2} \leq 0 \\
x_{ij} P_{ji,m}^{line2} + x_{ij} Q_{ji,m}^{line2} - Q_{ij,m}^{loss} V_i^{m2} \leq 0
\end{cases} \quad (5)$$

如上式, 各项的含义已在前文逐一介绍, 这里不再赘述。如前文所述固定电压幅值后, 上述模型将转化为含混合整数项的 QCQP 优化问题。当前优化工具包对这一问题的解决相对更为成熟。

4. 算例分析

4.1. 基础数据

REDS (Repository of Distribution Systems)是由 Kavasseri 和 Ababei 两位学者携手设计的配电网标准分析库。该分析库旨在整合配电网研究中常用的模型体系, 特别是规模比较大的配电网模型, 从而为配电网研究分析服务。

本文中所使用的配电网模型均取自该模型库, 每套模型的节点连接关系及线路参数等基本信息均可以从 REDS 网站直接下载得到。在 REDS 标准配电网模型的基础上, 本文通过添加分布式发电设备、储能装置和互动负荷, 构造形成本文适用的大电网经济调度模型, 进而利用本文所提出的优化方法, 对分布式能源的运行方式进行优化, 以说明本文优化方法的有效性。

REDS-135 节点模型共包括节点 136 个(含根节点一个), 线路 135 条, 辐射状网络结构, 其网络连接关系如图 3 所示。

本算例中系统负荷曲线如图 4 所示。

如图 4 中分别表示系统的有功与无功负荷曲线。其中带“+”标示的实线表示系统有功负荷曲线; 带“ Δ ”的虚线表示系统无功负荷曲线。

同时, 本算例中新增加分布式发电设备 8 台, 储能装置 1 台, 整形负荷 1 处, 平移负荷 1 处。分布式发电设备中共有燃气轮机 5 台, 风电机组 2 处, 光伏机组 1 处, 其基本信息如表 2 所示。储能装置的基本信息如表 3 所示。

如上表 2 为多时段 REDS-135 节点算例系统中新增加的机组的基本信息表。上表中若机组没有所在项目的约束条件, 则值设为“-”。需要说明的是, 上表中功率因数和电压设定用于说明分布式发电设备的有功-无功运行特性, 恒功率因数控制方式的机组在本算例中其功率因数设定为 0.8, 恒电压控制方式的机组在本算例中其电压设定值为 1.05。一台机组仅能运行于一种控制方式下, 因此, 对于任何一台分布式发电设备其功率因数项和电压设定项, 仅能有一项取值, 另一项必须为“-”。风机、光伏的出力特性取自其预测信息, 各时段的情况不同, 因此, 上表中没有展示这两类分布式发电设备的爬坡速率和有功出力范围。

如表 3 为多时段 REDS-135 节点算例系统中新增加的储能装置的基本信息表。上表中若机组没有所在项目的约束条件, 则值设为“-”。

本算例中增加了一处整形负荷和一处平移负荷, 分别接于节点 30 和节点 68。

4.2. 优化结果分析

根节点的出力计划曲线如图 5 所示。图中, 带“+”标示的实线表示系统根节点的有功出力计划曲线, 带“*”标示的实线表示系统根节点无功计划曲线。

所添加的分布式发电设备的出力计划如图 6 所示。图中带“+”的实线表示机组的有功出力计划, 带“ Δ ”的实线表示无功出力计划。在优化过程中, 特别将风机和光伏的价格因数设定值降低, 以提高其消纳比例。同时, 可以发现对于编号为 3、5、7 的三台燃气轮机, 由于采用恒电压控制模式, 无功出力受其节点电压影响, 而对于编号为 4、6 的两台燃气轮机, 由于采用恒功率因数控制模式, 因此在运行过程中其, 有功和无功出力式中保持比例恒定。

如图 7 表示的是储能装置的运行状态, 图中储能装置的运行状态取值为“1”时, 表示其处于储能阶

段，从电网吸收能量；当其运行状态取值为“-1”时，表示其处于放电状态，向电网发出能量；当取值为“0”时，表示储能装置与电网之间没有能量交换。图 8 表示储能装置与电网能量交换情况，当交换功率为正值，表示储能装置从电网吸收的电能；交换功率为负值，表示储能装置向电网放出的电能。

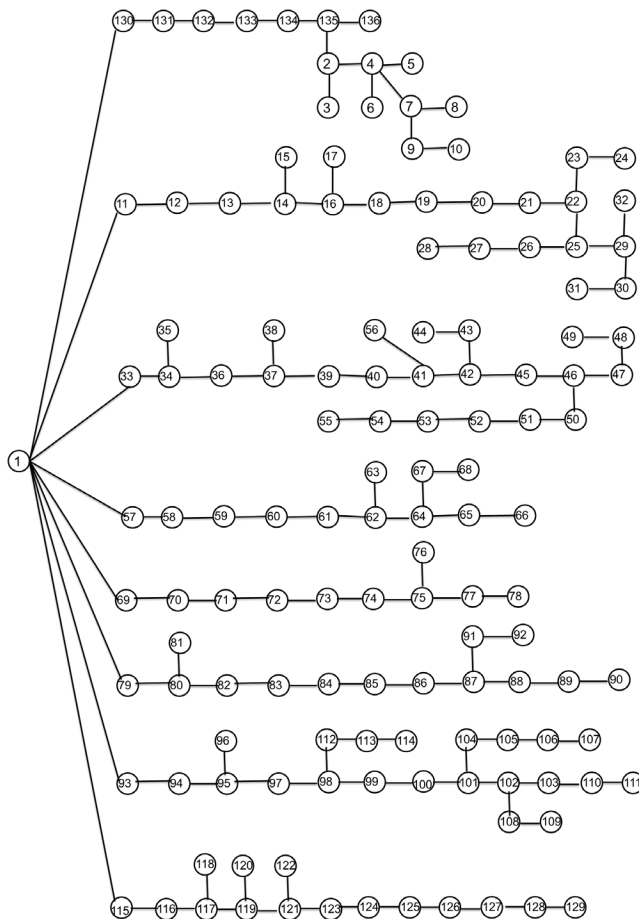


Figure 3. REDS-135 nodes system network connection diagram
图 3. REDS-135 节点系统网络连接图

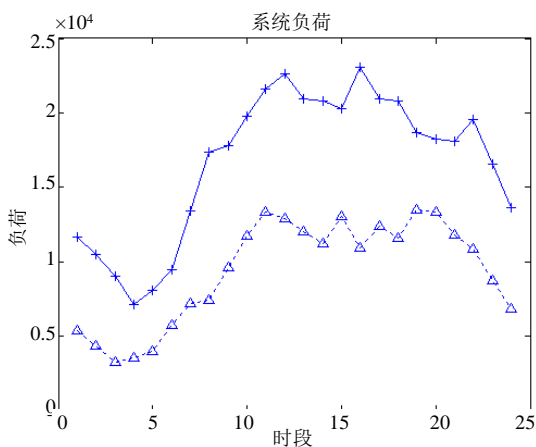


Figure 4. REDS-135 nodes system load curve
图 4. 多时段 REDS-135 节点算例系统负荷曲线图

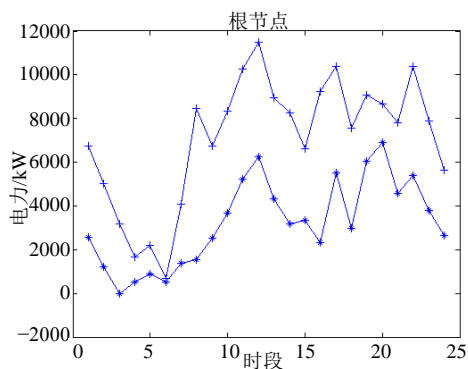


Figure 5. REDS 135 node example root node output
图 5. 多 REDS-135 节点算例根节点出力计划曲线

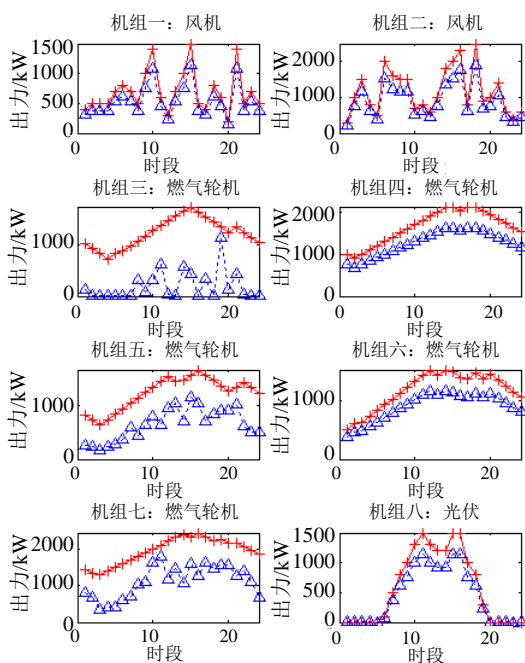


Figure 6. REDS 135 node example root node output
图 6. REDS-135 节点算例分布式发电设备运行曲线

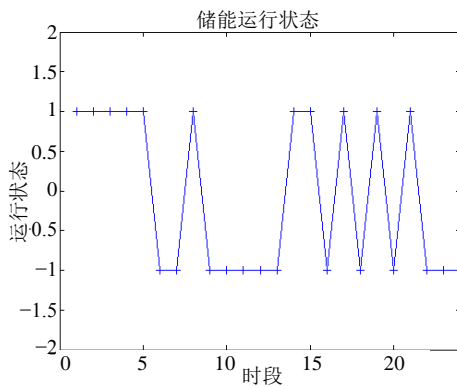


Figure 7. REDS 135 node example root node output
图 7. 多时段 REDS-135 节点算例储能装置运行状态

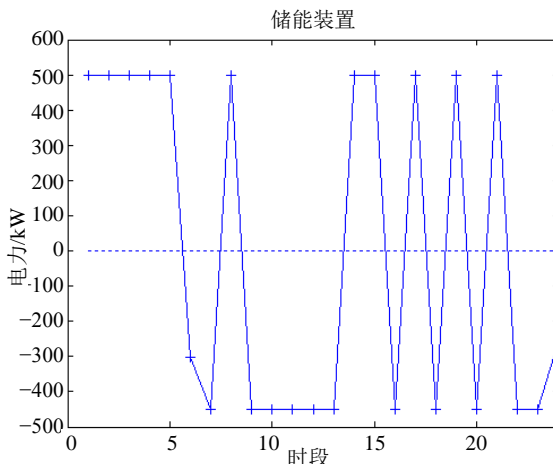


Figure 8. REDS 135 node example root node output
图 8. 多 REDS-135 节点算例储能装置能量交换曲线

Table 2. REDS-135 node example additional units parameter table

表 2. 多时段 REDS-135 节点算例新增机组参数表

序号	节点	对象	因数	电压	爬坡(kW/15min)	有功范围/kW
1	2	风机	0.8	-	-	-
2	22	风机	0.8	-	-	-
3	37	燃气	-	1.05	100	(0, 1500)
4	46	燃气	0.8	-	100	(0, 2000)
5	62	燃气	-	1.05	100	(0, 1500)
6	86	燃气	0.8	-	100	(0, 1500)
7	101	燃气	-	1.05	100	(0, 2500)
8	121	光伏	0.8	-	-	-

Table 3. REDS-135 node example additional energy storage parameter table

表 3. 多时段 REDS-135 节点算例储能参数表

序号	节点	初始/kWh	最大/kWh	有功范围/kW	放电有功/kW	因数	电压
1	39	0	2000	(10, 500)	(0, 500)	0.9	-

5. 结论

本文针对当前新型电源大量接入实际问题，提出了多种电源接入下大电网经济调度模型，并研究了基于 QCQP 迭代的高效求解算法。实际算例表明本文所提出的模型与算法不仅具有较高的计算精度，同时计算效率明显优于当前已有算法，能够有效解决不同类型电源接入下电网的调度运行分析实际需要。期望本文工作对新能源接入下电网调度运行水平提升有所裨益。

参考文献 (References)

- [1] 张运洲, 白建华, 辛颂旭. 我国风电开发及消纳相关重大问题研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(1): 1-6.
- [2] 肖创英, 汪宁渤, 陟晶, 丁坤. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 64-67.

- [3] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 韩丰, 范高峰. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
- [4] 辛颂旭, 白建华, 郭雁珩. 甘肃酒泉风电特性研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(12): 16-20.
- [5] 孙荣富, 张涛, 梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 70-76.
- [6] 刘德伟, 黄越辉, 王伟胜, 郭剑波. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 77-81.
- [7] 徐乾耀, 康重庆, 江长明, 陈之栩, 刘军. 多时空尺度风电消纳体系初探[J]. 电力系统保护与控制, 2013(1): 28-32.
- [8] 刘开俊. 风电并网对电网的影响分析及解决方案[J]. 中国电力, 2012, 45(9): 7-10+16.