

The Strategy and Social Benefits of Intraday Rolling Energy-Saving Scheduling Using Joint Optimization of Generation and Transmission in China Southern Power Grid

Qingbiao Lin¹, Shizhi He¹, Xingguang Song¹, Zhifei Liang¹, Honghui Kuang², Deliang Zhang²

¹Southern Power Grid Dispatch Center, Guangzhou Guangdong

²Beijing Qingdakeyue Corporation, Beijing

Email: eplqb@csg.cn, songxg@csg.cn, lzhifei@sina.com, kuanghonghui@263.net, 18736078321@163.com

Received: Nov. 26th, 2015; accepted: Dec. 8th, 2015; published: Dec. 15th, 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

Energy-saving in electricity industry is regarded as one of important strategic targets in “Twelfth Five-Year Plan” for energy. And it is the key issue for deregulation of generation schedule in revolution of power market. CSG is facing a challenging topic of mining potential for the whole process of real electric energy production. The intraday rolling optimization strategy under the circumstance of AC/DC hybrid operation mode of regional grid is discussed. This paper proposed a new strategy about high energy-consumption and clean energy replacement as well as optimizing transmission distribution in AC/DC channels. A Joint iterative optimization process was proposed to solute generation and transmission models with a target of minimizing real-time energy consumption increment. The assessment of economic benefits and energy-saving profit based on practical data proved huge potential of intraday rolling energy-saving scheduling using joint optimization of generation and transmission.

Keywords

AC/DC Hybrid, Intraday Rolling Energy-Saving Scheduling, Inter-Province Power Exchange, Joint Optimization of Generation and Transmission

发输电联合优化的区域电网日内滚动节能调度策略及社会效益

林庆标¹, 和识之¹, 宋兴光¹, 梁志飞¹, 匡洪辉², 张德亮²

¹南方电网调度中心, 广州

²北京清大科越科技有限公司, 北京

Email: eplqb@csg.cn, songxg@csg.cn, lzhifei@sina.com, kuanghonghui@263.net, 18736078321@163.com

收稿日期: 2015年11月26日; 录用日期: 2015年12月8日; 发布日期: 2015年12月15日

摘要

电力工业节能减排是国家“十二五”能源发展战略的重要目标,也是新一轮电改中放开发用电计划必须兼顾的关键因素,进一步挖掘电力生产全过程节能潜力是未来电网面临的挑战性课题。本文针对某区域电网交直流并联运行的特有方式,提出以日内滚动的跨省交易实现高、低能耗能源互补,以交直流潮流优化分配实现输电运行经济性最优,最终实现日内滚动节能调度的发输全过程优化。为了适应大电网快速优化决策的需要,本文进一步设计了发输电联合迭代优化计算流程,并对日内滚动节能调度的经济、节能效益进行了测算,揭示了实施发输电联合优化的日内滚动节能调度的巨大效益空间。

关键词

交直流并联, 日内滚动节能调度, 省间交易, 发输电联合优化

1. 引言

电力工业节能减排是国家“十二五”能源发展战略的重要目标。实施能源基地与产业中心互补的跨省区节能发电调度可以挖掘巨大的节能潜力和经济效益已是业内共识[1]-[5];从时序维度来看,由于水、风、光等清洁能源发电预测误差客观存在,以日内滚动节能调度消纳清洁能源的波动已成为业内共识[6]-[9]。

近年来,随着我国西部能源基地的陆续建成投产,以及跨省跨区域主干输电网架的发展壮大,目前我国已经形成西北部大风电基地、西南部大水电基地通过500 kV及以上交直流输电网向东部经济发达地区大规模输送的“西电东送”态势。近年来,西南省份水电装机飞速增长,各流域弃水压力与日俱增,执行跨省区电力调配的区域电网承受的节能环保压力日益加大,区域电网的日前及日内节能调度思路已经逐步由传统的“省内偏差平衡、确保省间交易”逐步向“集区域之力深度吸纳清洁能源”的新思路转变。目前国内大部分区域电网调度机构缺乏精细量化的日内滚动决策工具,仅依赖人工经验,粗略考虑输电通道裕度、气象及来水情况,动态调整水火电发电比例、增加富余省份水电输出的交易计划。因此,在日内滚动环节进一步科学量化、调用清洁能源替代高能耗电源,不仅有利于减少电力工业的碳排放,也将为全社会带来巨大的经济效益。

本文以国内某区域电网为例,分析了区域电网交直流并联运行的特性,指出发、输电环节尚有节能降损潜力可控;进一步提出了发电、输电环节全过程联合优化的节能调度策略,并针对大电网在线决策

的需要构造了快捷实用算法。构造区域电网夏季汛大方式算例对日内滚动节能调度效益进行测算，并进一步预估了全年的累计效益。本文的研究结果表明，在区域电网实施日内滚动节能发电调度，具有环保和经济两方面的巨大潜力。

2. 发输电联合优化的潜力分析

2.1. 交直流并联区域电网的运行特性

直流输电的功率调节迅速而灵活，其本身不存在同步运行的稳定性问题且不会增加交流系统的短路容量，因而被认为是较理想的大容量、远距离输电方式。将直流输电与 500 kV 及以上交流输电网共同联接送端能源基地和受端负荷中心，构成的交直流并联电网，具有交直流潮流分配可控、运行方式灵活等优点，成为当前技术水平下跨区域输电的首选运行方式。

国内某区域电网已经建设成为交直流并联运行、输送极限超过 3000 万千瓦的西电东送大通道，清洁能源西电东送规模始终保持较高水平。其示意图如图 1 所示。

2.2. 实施日内滚动节能调度势在必行

自 2012 年迎峰度夏以来，该区域网调实施以全力吸纳水电为指导思想的实时调度策略。2012 年至 2014 年，调度员为吸纳汛期富余水电临时调整省间计划超过 2200 余次，安排西电增送最大电力 170 万 kW，电量近 10 亿 kWh。在总结成功经验的基础上，开始深入思考如何进一步科学量化、优化实时节能发电调度变得更加迫切。

此外，根据电改 9 号文及相关配套文件精神，将稳步放开发用电计划、在区域市场中建设现货市场试点。从对电网安全的影响来看，日内滚动节能调度可以看作是日内交易的先行者，对于探索节能调度与优先发电权衔接、向市场交易过渡具有重要意义。

因此，从电网当前客观运行需要和未来电力市场改革大势两方面综合研判，开展日内滚动节能调度势在必行。

2.3. 发、输电联合优化的优势

在清洁能源吸纳方面，目前已经开始探讨“跨省优化、省内挖潜”的实时调度策略[10]：

1) 正向电力支援：对于负荷偏高的省区，应在满足电网安全约束的前提下在全网范围内寻找低能耗/低价的电源，通过省内或省间实时交易为该省提供正向电力支援；

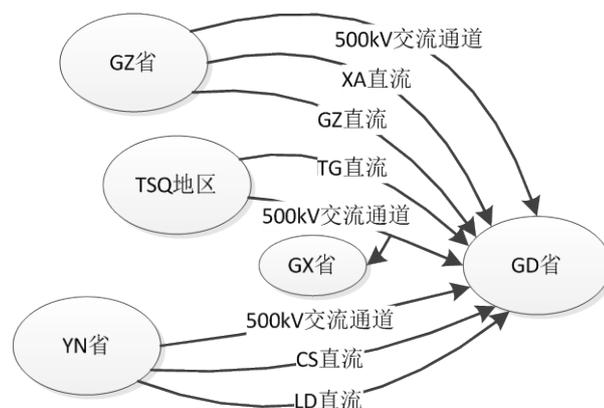


Figure 1. Scheme of AC/DC hybrid transmission network
图 1. 区域电网交直流输电示意图

2) 向下调峰支援: 对于负荷偏低的省区, 应在满足电网安全约束的前提下在全网范围内压减高能耗/高价电源, 为该省提供跨区的向下调峰支援。

该策略仅考虑优化发电方式实现能耗最低, 并未统筹考虑进一步优化输电方式, 未充分利用直流输电计划的可控性。

在交直流并联大电网的输电降损方面, 目前的研究成果主要关注交直流调整降损算法的有效性。与经济调度中的发电成本等微增率法则十分相似, 当系统网损最小时, 直流系统的网损微增率等于交流系统对于直流功率调整的网损微增率, 这就是直流潮流调整的网损等微增率原则[11]。然而, 交直流网损优化策略尚未用于实际业务, 调度及方式专业人员出于稳妥起见即使发现交直流通道网损微增率存在差异, 仍不会轻易调整有功潮流分配, 因此交直流调整降损策略尚未在实时运行中落地应用。

综合来看, 目前各方对于发、输电环节的日内滚动节能调度研究相对孤立, 并未考虑发、输电齐头并进统筹协调的客观需要。对于国内的交直流并联区域电网, 在合理安排系统发电资源、配置无功的同时, 若能优化调整直流输送功率, 将有功潮流科学分配在多个交直流输电通道上, 理论上可以实现发电、输电全过程的节能降损最大化, 区域电网的节能降损效益有望进一步提升。

3. 日内滚动节能调度策略设计

3.1. 日内滚动节能调度原则

1) 区域主导原则: 区域调度负责跨省送受电计划更改, 各省市调度配合, 充分利用省间输电通道。

2) 偏差修正原则: 为保证日调度计划的严肃性, 日内滚动节能调度仅平衡超短期负荷预测与日前负荷预测的偏差。

3) 发电侧节能调度原则: 采用文献[10]提出的“成果共享模式”。若某省区负荷偏高, 区域调度负责在全网范围内搜索低能耗/低价的电源对其支援; 若某省区负荷偏低, 由该省自行调减高能耗机组, 区域调度负责实时监控及事后考评。优先以清洁能源替代高能耗煤电; 化石能耗相同时, 优先调用低价电源, 兼顾节能与效益, 实现综合能耗最小化。

4) 输电侧节能调度原则: 因发电计划更改联动西电东送输电计划发生变更时, 应优先安排网损微增率小的通道增加有功潮流, 并优先安排网损微增率大的通道降低有功潮流。

3.2. 网调主导、省调配合的日内滚动节能调度流程

以 T 时开始安排 T+1 至 T+2 的日内计划为例。T 时区域调度启动计算, 依据节能排序安排各省区“虚拟日内滚动发电计划” A, 并据此编制“跨省日内滚动输电计划” B。T 时 30 分区域调度下发 B 至各省调。T 时 45 分省调应根据 B 编制本省“日内滚动发电计划” A', T+1 至 T+2 时执行。区域调度定期校验各省调 A' 计划与网调 A 计划的差异, 以评估省调调用机组是否满足节能排序原则。

4. 日内滚动优化问题的求解

4.1. 基本假设

基于图 1 的电网示意图, 优化问题的基本假设条件如下:

1) 发电决策: 考虑 GD 省煤、水电, GX 省煤、水电, YN 省煤、水电, GZ 省煤、水电, 以及 TSQ 地区水电, 共 9 种发电决策变量。

2) 输电决策: 共考虑 YN 省送出(CS 直流、500 KV 交流)、GZ 省送出(XA 直流、GZ 直流、500 kV 交流)、TSQ 送出(TG 直流、500 kV 交流) 3 组共计 7 个交直流断面。

4.2. 发输电联合优化的计算流程

按照“区调主导、省调配合”的决策思路，一个完整的日内滚动节能调度计划必须经过区调、省调两级配合，区调下达给各省区“虚拟日内滚动发电计划”仅为各类型电源的总体计划，并未落实到具体电厂，仍无法精确计算各条线路潮流，同时也无法测算各交直流通道的网损微增率。另一方面，由于日内滚动节能调度计划中跨省输电计划增量不大，通常少于西电东送计划 5%。因此，可近似认为发电侧优化前后各通道网损微增率保持不变。

基于上述简化，进一步考虑到大电网在线决策快捷、直观性要求，将日内滚动节能调度问题分解为“发电侧节能优化”与“输电侧降损优化”两个数学模型迭代求解，实现发输电联合优化。其中发电侧模型及求解算法详见文献[10]，输电侧优化模型及求解算法详见文献[11]，本文不再赘述。发输电联合优化流程如图 2。

5. 算例分析与潜力测算

5.1. 算例分析

夏季汛大方式，全网总负荷偏差 600 MW。GD 省水电备用仅有 400 MW，煤电备用充足，其余各省各类电源备用充足。GD 省间交直流断面总裕度仅 300 MW。各省区各类型电源能耗取上一年度平均值。交直流通道送电能力取当年迎峰度夏期间的极限值。

目前区域调度 EMS 已实现基于状态估计数据实时计算各交直流通道的网损微增率。因未来状态估计数据无法获取，导致网损微增率用于几个小时后的输电优化的效果不尽如人意，因此本算例只做未来 1 小时(4 个时段)的滚动计算。

设置某日 10:00 至 11:00 各省区负荷偏差、通道网损微增率如表 1。

采用两类策略进行效益对比：1) 仅优化发电侧、2) 发输电联合优化。按照 4.2 节流程计算，结果如表 2 所示。

发电侧优化方面：两种策略的思路完全一致，均采用 YN 省水电替代 GD 省和 GZ 省内电源，同时压减 YN 省煤电配合本省向下调峰，既减少发电总成本，又减少了发电总煤耗，因而降低了全网发电能耗。

输电侧优化方面：

1) 在联合优化策略下，YN 省优先采用网损微增率较小的 CS 直流增加送出，西电东送通道增加网损电量 20 MWh，均由 YN 省内机组承担。

2) 在仅优化发电策略下：

YN 增发电量默认由 YN 省 500 kV 交流通道增送，西电东送网损增量高达 69 MWh。由于优化模型中忽略输电通道网损，该网损量将由受端 GD 省内平衡机组(抽水蓄能、燃煤或燃气机)承担，考虑到其发电成本及能耗均高于 YN 省水电，无法实现能耗和成本最优。

综合比较两类策略的优化结果，发输电联合优化策略不仅可以有效地在全网寻找低价低能耗电源替代高价高能耗电源，同时可以利用损耗较小的输电通道传输电力，并将网损闭环反馈至发电侧优化中，通过迭代计算实现发电与输电全过程节能降损效果最优化。

5.2. 全年效益宏观估计

2014 年该区域电网西电东送电量约 1480 亿 kWh，据统计调度安排省间实时交易电量约占 2%，29.6 亿 kWh。假设这 29.6 亿 kWh 电量严格执行发输电联合优化的日内滚动节能调度策略，全年近似节约标

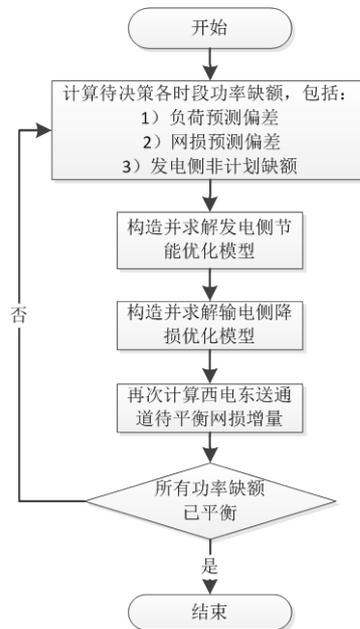


Figure 2. Joint iterative optimization process for generation and transmission models
图 2. 发输电联合优化的迭代求解流程

Table 1. Power flow data of energy transmission from west to east
表 1. 西电东送潮流数据

省区	10:00~11:00 偏差(MW)	直流通道			交流通道	
		名称	功率(MW)	网损稳增率	功率(MW)	网损微增率
YN	-200	CS	4500	0.051		0.172
GZ	100	GZ	2500	0.071		0.145
		XA	2500	0.105		0.160
TSQ	0	TG	1600	0.120		0.164
GD	700	-	-	-	-	-

Table 2. Intraday rolling energy-saving scheduling results
表 2. 日内滚动节能发电调度优化结果

优化策略	仅优化发电	发输电联合优化
发电煤耗增量(吨)	-51	-65.7
西电东送网损增量(MWh)	69	20
购电成本增量(万元)	29.3	26.7
GD 省水电增量(MWh)	400	400
GD 省煤电增量(MWh)	69	
YN 省水电增量(MWh)	400	420
YN 省煤电增量(MWh)	-200	-200
GD 省受入增量(MWh)	300 (500 kV 交流)	400 (直流) -100 (500 kV 交流)
YN 省外送增量(MWh)	400 (500 kV 交流)	420 (直流)
贵州外送增量(MWh)	-100 (500 kV 交流)	-100 (500 kV 交流)

准煤 45 万吨, 节约购电成本 3.8 亿元。按照 2014 年环渤海 5500 大卡动力煤综合平均价格约 500 元/吨计算, 全年节约的煤耗成本相当于 2.3 亿元, 全社会福利(节约购电成本与煤耗成本之和)可达 6.1 亿元。

按文献[5]给出的测算方法, 可进一步测算污染气体、温室气体的减排量, 全年可减排 CO₂ 累计 4.4 万吨, 减排 SO₂ 累计 2.8 万吨, 减排 NO_x 累计 0.36 万吨。

5.3. 进一步讨论

1) 本策略中省区各类型电源的节能调度优先级、节能效益测算相对粗糙, 原因是发电优化模型建模时粗略采用了各省区各类型电源的发电煤耗、电价的平均值。

2) 目前区域调度 EMS 仅能基于实时状态估计数据计算各输电通道的网损微增率, 导致发输电联合优化策略的适用时间窗口长度受限, 无法编制几个小时后的节能调度计划。为扩展日内滚动的前瞻性, 建议日运行方式中能够进一步给出次日 96 时段的交直流通道网损微增率, 以便于日内滚动决策参考。

6. 结语

本文阐述了区域电网日内滚动节能发电调度的客观需求和运行机理, 基于成熟的发、输电节能降损优化技术提出了发输电联合优化的日内节能调度策略, 设计了发输电模型迭代求解流程。通过实际电网算例, 对仅开展发电优化、发输电联合优化两种策略的节能降损效益进行了测算对比, 并进一步估算了日内滚动节能发电调度的全年累计效益。分析显示, 针对交直流并联区域电网推进发输电联合优化的日内滚动节能发电调度策略可以进一步挖掘全网节能潜力, 加强区域电网对清洁能源的深度利用, 产生巨大的节能和经济效益。

参考文献 (References)

- [1] 国家发展和改革委员会, 国家环境保护总局, 国家电力监管委员会, 国家能源领导小组办公室. 节能发电调度办法(试行) [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2007-08/28/c_131053158.htm, 2007-08-02.
- [2] 王庭飞, 孙斌, 郭翔, 赵维兴. 节能发电调度技术研究及实践与效果分析[J]. 南方电网技术, 2009, 3(Z1): 1-7.
- [3] 陈启鑫, 周天睿, 康重庆, 夏清. 节能发电调度的低碳化效益评估模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 24-29.
- [4] 骆晓明, 马煜华, 陈亮. 广东省节能发电调度的社会效益评估新方法[J]. 中国电力, 2010, 43(9): 1-5.
- [5] 何超林, 梁寿愚, 宋兴光, 丁军策. 南方电网节能发电调度计划编制思路、实践及效果[J]. 南方电网技术, 2012(2): 58-61.
- [6] 施建华, 谭素梅. 节能发电调度发电计划编制算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 48-51.
- [7] 钟海旺, 康重庆, 陈慧坤, 骆晓明, 李嘉龙. 广东电网节能发电调度潜力分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 7-12.
- [8] 宋兴光. 南方电网节能发电调度省间优化问题研究[J]. 广东电力, 2010, 23(8): 14-15, 19.
- [9] 傅书邈, 王海宁. 关于节能减排与电力市场的结合[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 31-34.
- [10] 梁志飞, 叶骏. 南方电网实时节能发电调度策略及其潜在效益[J]. 南方电网技术, 2014, 8(2): 100-104.
- [11] 刘恺, 陈亦平, 张昆, 侯君, 李建设, 侯云鹤, 唐宝. 大型交直流并联输电电网网损优化理论及其在南方电网中的实现[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 130-136.