

DOI: 10.7667/PSPC150704

## 安全约束经济调度中有功潮流调整方法

黄国栋<sup>1</sup>, 崔晖<sup>1</sup>, 许丹<sup>1</sup>, 丁强<sup>1</sup>, 翟晓磊<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 天津市电力公司电力调度控制中心, 天津 300010)

**摘要:** 计算电网的计划潮流是安全约束经济调度的重要内容。针对计划潮流中外网等值粗糙、结果偏差较大的问题, 提出了一种改进的安全约束经济调度中有功潮流调整方法。首先获取计划数据和网络模型, 进行无网络约束计划编制, 然后结合准稳态灵敏度、联络线自适应等值和有功平衡等方法计算计划潮流, 如果潮流越限则增加网络安全约束重新编制计划。该方法简单易行, 能提高计划潮流精度, 为计划编制提供可信的潮流信息。通过实际工程算例测试表明, 该方法能满足实用要求, 具有良好的可靠性和实用性。

**关键词:** 安全约束经济调度; 计划潮流; 联络线等值; 准稳态灵敏度

### A method of active power flow adjustment in security constrained economic dispatch

HUANG Guodong<sup>1</sup>, CUI Hui<sup>1</sup>, XU Dan<sup>1</sup>, DING Qiang<sup>1</sup>, ZHAI Xiaolei<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Tianjin Electric Power Dispatching Control Center, Tianjin 300010, China)

**Abstract:** Schedule power flow calculation is an important part of the security constrained economic dispatch (SCED). General foreign net equivalent is rough and the results are of large deviations, therefore an improved method of active power flow adjustment in security constrained economic dispatch is proposed. First, the schedule data and the network model are acquired to make power generation plan without security constrained. Then schedule power flow is calculated under consideration of sensitivity with quasi-steady state, tie line adaptive equivalence and active power balance. Making new power generation plan with security constrained is needed when active power of line is off-limit. The method is simple and can improve the accuracy of schedule power flow and provide credible information for power generation plan. Test results on the practical engineering examples show that the method can meet the practical requirements, with good reliability and practicality.

**Key words:** security constrained economic dispatch; schedule power flow; tie line equivalence; sensitivity with quasi-steady state

## 0 引言

发电计划是智能调度的一项重要基本工作, 是实现电力系统安全、稳定、经济、优质运行的重要保障。新形势下, 随着跨省跨区大电网互联和特高压交直流输电的快速发展, 电网输电容量逐渐接近最大容量, 电网安全运行难度逐渐增加, 调度计划工作更加需要满足“信息化、科学化、精细化、精确化”的要求。

安全约束经济调度(SCED)能综合考虑系统平衡约束、电网安全约束、机组运行约束以及各种实用化约束, 采用考虑安全约束的优化算法编制未来

多时段的发电计划, 既能实现电网经济节能, 又能保障电网的安全运行, 提高短期发电计划的可操作性, 实现调度计划的精细化管理。在国外, 市场规则和技术支持系统的发展较为成熟, 日前发电计划的研究侧重电力市场环境下的有功发电计划<sup>[1-2]</sup>。在国内, 以安全约束经济调度为核心的短期发电计划也已经得到研究和应用<sup>[3-7]</sup>。

安全约束经济调度的关键点之一是计算电网的计划潮流, 并根据潮流结果对越限输电线路和断面进行调整。实际生产中计算计划潮流需要对外网进行等值, 而且随着电网的发展, 单一区域电网与外部边界不再那么简单, 粗略的联络线等值对区域内

部的计划潮流将造成较大偏差，在负荷较重时期将直接影响安全约束调度计划的准确性。文献[4-9]均提出了基于安全约束经济调度的优化模型，考虑网络安全约束，但是都没有涉及实际中的联络线等值；文献[10-12]在分析计划潮流时，通过历史数据形成交换计划和联络线功率的分配系数，然后再对联络线进行等值形成外网模型。这种方法没有考虑实际外部电网的网络特性和未来运行状态，当联络线功率出现波动时，误差比较大。

针对上述问题，本文从工程实际出发，基于安全约束经济调度和直流潮流模型，分析电网有功潮流约束，并对有功潮流计算和调整中所涉及的联络线等值、灵敏度求解等问题展开讨论，提出一种安全约束经济调度中输电线路和断面有功潮流调整方法。该方法将计划数据、网络模型进行整合，通过联络线等值、准稳态灵敏度等方法修正直流潮流，为安全约束调度提供可信的潮流结果。

## 1 安全约束经济调度

### 1.1 系统流程

安全约束经济调度的系统流程如图 1 所示。其中数据准备是整合各类基础数据，包括机组信息、负荷预测、检修计划、交换计划、电网拓扑模型等。网络潮流模型是通过正常态网络模型数据、检修计划和联络线等值拼接得到。通过安全约束经济调度进行计划编制，得到机组计划，在初次进行计划编制的时候，不考虑网络安全约束，计划潮流生成后，如果支路或断面潮流出现越限，再增加网络安全约束，重新编制发电计划，调整机组出力，直到消除潮流越限。

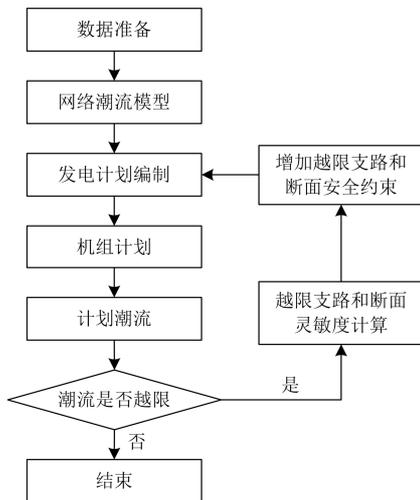


图 1 SCED 计算流程

Fig. 1 Flow chart of SCED

### 1.2 安全约束经济调度模型

安全约束经济调度优化目标是在计划周期内使机组的运行费用最小。其目标函数是

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C_i[p_i(t)] \quad (1)$$

式中： $T$ 是计划周期内的时段数； $I$ 是机组总数量； $p_i(t)$ 是 $t$ 时段机组 $i$ 的有功功率； $C_i[p_i(t)]$ 是 $t$ 时段机组 $i$ 的运行成本。

机组运行成本 $C_i[p_i(t)]$ 通常用二次函数表示：

$$C_i[p_i(t)] = a_i p_i^2(t) + b_i p_i(t) + c_i \quad (2)$$

式中， $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 为二次函数系数。

系统有功平衡约束

$$\sum_{i=1}^I p_i(t) = P_L(t) \quad (3)$$

式中， $P_L(t)$ 表示 $t$ 时段的系统负荷预测。

机组限值约束

$$p_{i,\min} \leq p_i(t) \leq p_{i,\max} \quad (4)$$

式中， $p_{i,\min}$ 、 $p_{i,\max}$ 分别表示机组 $i$ 的有功出力下限和上限。

机组爬坡约束

$$\begin{cases} p_i(t) - p_i(t-1) \leq p_{i,\text{up}} \\ p_i(t-1) - p_i(t) \leq p_{i,\text{down}} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $p_{i,\text{up}}$ 、 $p_{i,\text{down}}$ 分别表示机组 $i$ 的上爬坡限值和下爬坡限值。

网络安全约束

$$\left| \sum_{i=1}^M \{ [p_i(t) - l_i(t)] S_{ki}(t) \} \right| \leq \bar{P}_k \quad (6)$$

式中： $M$ 是系统节点数； $l_i(t)$ 表示 $t$ 时段节点 $i$ 的有功负荷； $S_{ki}(t)$ 表示 $t$ 时段第 $k$ 支路对节点 $i$ 的潮流灵敏度； $\bar{P}_k$ 表示支路 $k$ 的有功功率上限。

## 2 计划潮流生成

### 2.1 数据整合

获得正确的网络模型数据是潮流计算的基础。本文从能量管理系统获取正常态网络模型数据，从中提取网络的拓扑关系和元件参数，并考虑日前设备的检修计划，形成未来态电网拓扑模型。同时，随着智能电网调度控制系统在国家电网公司范围内的推广应用，各省调度中心可以获取外部调度区域的电网模型和计划数据，并通过联络线等值处理得到边界上外网潮流模型。另外，配合负荷预测、交换计划等各类计划数据，就可由日前计划潮流生成算法得到日前计划潮流。

## 2.2 准稳态灵敏度

虽然直流潮流灵敏度精度不如交流潮流模型灵敏度, 但在电网调度自动化和输电系统规划等需要大量计算的场合仍得到广泛应用<sup>[13]</sup>。假设第  $k$  条线路两端节点号为  $p$  和  $q$ , 那么线路直流潮流灵敏度可以表示为

$$S_{ki} = (X_{pi} - X_{qi}) / x_k \quad (7)$$

式中:  $S_{ki}$  表示第  $k$  条线路的线路潮流对第  $i$  个节点有功输出的灵敏度;  $X_{pi}$  和  $X_{qi}$  表示直流潮流阻抗矩阵中对应位置的阻抗值;  $x_k$  表示线路  $k$  的阻抗。

另外, 对于给定的一个运行断面, 平衡节点选择在理论上不影响潮流计算的结果, 也就是说无论选择哪台发电机作为平衡机, 计算出来的潮流分布都符合给定的运行断面。但是选择不同的平衡节点可能对支路灵敏度产生显著影响, 可以得到完全不同的灵敏度。这是因为处于不同位置的平衡机吸收其他发电机功率的微小增量时, 对当前的潮流分布产生不同的影响, 而且当系统存在较大的有功不平衡量时, 这部分不平衡量将全部由平衡机承担, 导致平衡机附近支路灵敏度较大。为减小平衡机选择对潮流计算的影响, 借鉴文献<sup>[14]</sup>中准稳态灵敏度的求解方法, 功率不平衡量将根据系统频率响应特性由各发电机或负荷分担, 摆脱了常规灵敏度分析的局限性。

$$\mathbf{S}_{xu}^R = \mathbf{S}_{xu} \cdot \mathbf{F}_u \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_u = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_1 & -\alpha_1 & \cdots & -\alpha_1 \\ -\alpha_2 & 1 - \alpha_2 & \cdots & -\alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_N & -\alpha_N & \cdots & 1 - \alpha_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{S}_{xu}^R$  为准稳态灵敏度矩阵;  $\mathbf{S}_{xu}$  为常规灵敏度矩阵;  $\mathbf{F}_u$  为准稳态物理响应线性化后的系数矩阵;  $\alpha_i$  为第  $i$  个母线功率注入的分担系数。

## 2.3 联络线等值

常规的联络线等值方法是通过历史相似日信息形成计划日交换计划和联络线功率的分配系数, 而本文则通过网络模型自适应调整进行联络线外网等值, 总体思路是先从整体模型求解联络线潮流, 然后再等值到待求的区域模型中, 详细步骤如下:

1) 电网模型自适应调整。为了更准确地得到联络线路潮流, 在本调度区域的基础上, 依据联络线路和拓扑关系, 将电网模型外向扩展到和联络线路相关的外部区域。如图 2 所示, 区域 A 和区域 B、区域 C、区域 D 通过联络线相连, 则将电网模型扩

展到区域 A、B、C、D 组成的整体, 那么区域间的联络线就变成内部线路。以省级调度为例, 则可以把模型拓展到分中心的调度模型。

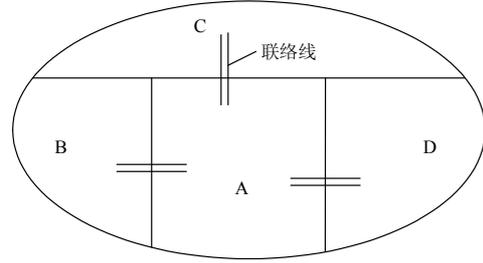


图 2 电网模型自适应调整

Fig. 2 Power net model adaptive equivalence

结合已经获取的外部电网的计划数据, 通过直流潮流和灵敏度计算得到联络线路的计划潮流。

$$L_k(t) = \sum_{i=1}^M \{ [P_i(t) - l_i(t)] S_{ki}(t) \} \quad (10)$$

式中:  $M$  为系统节点数;  $L_k(t)$  表示第  $k$  条联络线  $t$  时段的有功功率;  $P_i(t)$  表示  $t$  时段节点  $i$  注入的有功功率;  $l_i(t)$  表示  $t$  时段节点  $i$  的有功负荷;  $S_{ki}(t)$  表示  $t$  时段第  $k$  条联络线对节点  $i$  的灵敏度。

2) 联络线有功再调整。通过上面的步骤, 可以初步求得各个联络线路的有功功率, 但是由于计算误差、预测偏差等原因, 各个联络线路有功功率累加和交换计划会存在偏差, 实际测试表明, 偏差在 2%~8% 之间, 因此, 需要对联络线有功再进行调整, 使之和交换计划一致。将功率偏差按照已经计算的联络线功率进行分配, 计算方法为

$$\bar{L}_k(t) = L_k(t) + \lambda_k \cdot \Delta p(t) \quad (11)$$

$$\lambda_k = L_k(t) / \left( \sum_{i=1}^N L_i(t) \right) \quad (12)$$

式中:  $\bar{L}_k(t)$  为第  $k$  条联络线  $t$  时段的最终有功功率;  $\Delta p(t)$  为  $t$  时段交换计划和联络线累加的偏差;  $\lambda_k$  为分配系数;  $N$  为联络线路总个数。

3) 联络线路等值。获得联络线路最终功率后, 根据电网等值方法, 将联络线等值成机组或者负荷, 完成外网等值, 再和本区域网络模型、检修计划拼接得到完整的网络拓扑模型。

## 2.4 有功平衡

在实际运行中, 机组还需要考虑厂用电和承担系统网损, 而且未建模小机组虽然不直接影响潮流计算, 但是会对功率平衡产生影响。另外, 相对于系统负荷预测而言, 母线负荷预测精度偏低, 预测

出的母线负荷值较粗糙，需要经过处理才能参与潮流计算。系统有功平衡式如式(13)。

$$P_L(t) = \sum_{i=1}^K P_{b,i}(t) + P_c(t) + P_s(t) + P_{um}(t) \quad (13)$$

式中： $P_L(t)$ 、 $P_c(t)$ 、 $P_s(t)$ 、 $P_{um}(t)$ 分别表示  $t$  时段的系统负荷预测、厂用电、网损和未建模小机组成出力； $P_{b,i}(t)$  表示  $t$  时段第  $i$  个母线的负荷预测； $K$  表示母线负荷总数量。

厂用电一般占系统负荷确定的比例，可以从历史数据中获取。网损率根据不同规模电网，可取值 1.1%~1.4%。未建模小机组出力则可以从调度计划系统得到。因此，当有功不平衡时，需要调整母线负荷预测，使系统有功达到平衡。调整步骤：

1) 计算有功不平衡量

$$\Delta P_L(t) = P_L(t) - \sum_{i=1}^K P_{b,i}(t) - P_c(t) - P_s(t) - P_{um}(t) \quad (14)$$

式中， $\Delta P_L(t)$  表示系统有功不平衡量。

2) 有功不平衡量分配到母线负荷上。将系统有功不平衡量按照分配系数分配到各个母线上，形成调整后的母线负荷预测值。

$$\gamma_i(t) = P_{b,i}(t) / (\sum_{j=1}^K P_{b,j}(t)) \quad (15)$$

$$\bar{P}_{b,i}(t) = P_{b,i}(t) + \gamma_i(t) \cdot \Delta P_L(t) \quad (16)$$

式中， $\gamma_i(t)$ 、 $\bar{P}_{b,i}(t)$  分别为  $t$  时段第  $i$  个母线的分配系数和调整后的预测值。

经过有功平衡的调整之后，系统有功功率达到平衡，可以计算计划潮流。当支路或断面出现潮流越限时，则计算越限支路和断面的灵敏度，并增加网络约束到经济调度中重新进行计划编制，调整机组出力，直到所有约束都满足。

### 3 算例分析

将本文的方法应用在天津电网日前调度计划中。天津电网属于典型城市电网，通过 17 条主要联络线路和河北、冀北等调度区域相连，受电量占到总用电负荷的比例较大。天津电网 110 kV 以上母线 720 个，110 kV 以上交流线路 346 条，建模机组 200 个，其电网结构图如图 3 所示。

以 2014 年 9 月 25 日的日前发电计划为例，该日负荷最大时刻联络线输入计划占总负荷的 65%，从本地调度计划模块获取计划日一天 96 点的系统负荷预测、母线负荷预测、交换计划、机组状态和检修计划、正常态电网模型等。同时利用智能电网

调度控制系统获得华北地区的电网模型、机组计划等数据。通过商业软件 cplex 求解安全约束经济调度模型，计算天津地区的机组计划，并将电网模型根据联络线落点情况扩展到华北区域，完成模型拼接，得到联络线等值模型和计划，再按上述方法，计算和调整计划潮流。

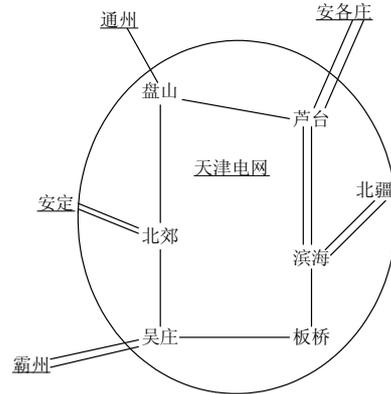


图 3 天津电网结构图

Fig. 3 Power network structure of Tianjin

#### (1) 联络线路潮流计算

为验证本文的有功潮流调整方法，分别从两方面对联络线计划潮流进行求解：(1) 一般等值方法潮流，此方法中将总交换计划按照相似日的分配系数进行分解，得到联络线潮流；(2) 自适应等值法潮流，此方法是按照上文的策略，依据电网模型自适应调整，得到联络线潮流。将上述得到的计划潮流和获取的当天实际潮流进行对比。表 1、表 2 展示了 04:00(低谷)和 11:00(早高峰)两个时刻的部分联络线潮流对比结果。通过表中结果可以看出，自适应等值法计算的联络线潮流更加接近实际潮流，偏差在 10% 以内。

表 1 联络线结果(4:00)

Table 1 Results of tie-line (4:00)

联络线名称	电压等级/ kV	一般等值	自适应等值	实际潮流/ MW
		法潮流/ MW	法潮流/ MW	
太渔二线	220	131	95	101
吴霸一线	500	764	649	684
盘北线	500	402	426	434
盘芦线	500	843	871	891
疆滨一线	500	799	758	708
安芦二线	500	525	561	578
疆滨二线	500	804	767	722
安北线	500	283	379	340

表 2 联络线结果(11:00)

Table 2 Results of tie-line (11:00)

联络线名称	电压	一般等值	自适应等值	实际
	等级/ kV	法潮流/ MW	法潮流/ MW	潮流/ MW
太渔二线	220	176	119	130
吴霸一线	500	794	658	693
盘北线	500	802	859	887
盘芦线	500	643	745	765
疆滨一线	500	952	831	853
安芦二线	500	109	157	167
疆滨二线	500	1 054	845	867
安北线	500	84	99	103

(2) 准稳态灵敏度

选取了大港电厂 2 号机组作为平衡机, 分别通过常规直流灵敏度和准稳态灵敏度对大港二线的计划潮流进行计算, 并选取 04:00(夜低谷)、11:00(早高峰)、12:00(白低谷)、16:00(晚高峰)共 4 个时刻的结果, 如表 3 所示。由于大港二线通过变压器和平衡机直接相连, 其潮流主要受平衡机影响。通过表 3 中的结果可以看出, 利用常规直流灵敏度计算的潮流结果偏差较大, 主要是因为常规直流灵敏度计算出来多个机组和负荷对平衡机附近的线路都有不同程度的影响, 不符合实际情况, 而准稳态灵敏度则把这种影响分摊到了全网, 潮流结果误差较小。另外, 大港二线的额定限值 473 MW, 在 11:00 时, 常规潮流结果已经越限, 按照安全约束经济调度计算流程, 支路越限后需要增加网络安全约束, 重新编制计划, 对计划潮流进行调整以消除越限。而且由于灵敏度偏差较大, 多个不相关机组的计划会被调整, 导致计划编制不合理甚至无法收敛。

表 3 线路潮流结果

Table 3 Results of line power flow

时刻	常规潮流	含准稳态潮流	实际潮流
	结果/MW	结果/MW	结果/MW
4:00	351	227	226
11:00	486	238	236
12:00	425	212	208
16:00	392	238	233

(3) 线路潮流统计

对比计划潮流和次日实际数据采集与监控系统的线路有功功率, 相对误差和合格率计算公式如式(17)和式(18)所示。

$$\varepsilon = |L_{i,t}^{real} - L_{i,t}| / L_{i,t}^{real} \quad (17)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^N m_i / (96 \cdot N) \quad (18)$$

式中:  $\varepsilon$  表示潮流相对误差;  $L_{i,t}^{real}$  表示  $t$  时段支路  $i$  的实际潮流;  $L_{i,t}$  表示  $t$  时段支路  $i$  的计划潮流;  $\lambda$  表示潮流计算的合格率;  $m_i$  表示支路或断面 96 个计算时段点中的合格点数, 如果一个时段  $\varepsilon < 10\%$ , 则认为该时段是合格点, 否则是不合格点;  $N$  是总的设备数, 包括支路和断面。

利用本文提到的方法, 进行安全约束经济调度计算, 并按小时对潮流相对误差进行统计, 潮流计算的合格率是 90.5%, 部分典型线路结果如表 4 所示。线路潮流的平均相对误差均在 10% 以下, 考虑到机组实际出力和计划出力的偏差, 计划潮流精度基本能满足工程实际的要求。

表 4 线路潮流统计

Table 4 Line power flow statistics

线路名称	电压等级/kV	最大相对误差/%	最小相对误差/%	平均相对误差/%
滨丽二线	500	10.6	3.3	6.5
芦滨二线	500	8.9	4.4	6.2
板盛一线	220	10.2	4.8	8.7
北仁一线	220	9.8	4.1	7.2

4 结论

本文针对传统联络线等值法的不足, 提出了一种安全约束经济调度中计划潮流调整方法。首先获取计划数据和网络模型, 进行无网络约束计划编制, 然后结合准稳态灵敏度、联络线自适应等值和有功平衡等方法计算计划潮流, 进而对有功潮流进行判断, 出现越限则增加安全约束重新编制计划。通过实际工程算例测试表明, 该方法简单易行, 能提高计划潮流精度, 为计划编制提供可信的潮流信息, 满足实用要求, 具有良好的可靠性和实用性。

参考文献

[1] DESHMUKH S R, DOKE D J, NERKAR Y P. Optimum generation scheduling with purchase of power from market and grid[C] // Proceedings of 2009 IEEE Region 10 Conference, January 23-26, 2009, Singapore: 1-5.

[2] STREIFFERT D, PHILBRICK R, OTT A. A mixed integer programming solution for market clearing and reliability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 21(4): 1127-1135.

- [3] 贺建波, 胡志坚, 刘宇凯. 大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 1-7.  
HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yukai. Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 1-7.
- [4] 朱晟, 葛敏辉, 毕晓亮. 安全约束调度系统在华东电网的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 2): 154-156.  
ZHU Sheng, GE Minhui, BI Xiaoliang. Application of security constrained dispatch system in East China Grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 154-156.
- [5] 郭琳, 文旭, 赵志强, 等. 计及节能风险评估的月度随机规划调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 22-29.  
GUO Lin, WEN Xu, ZHAO Zhiqiang, et al. A stochastic programming monthly generation dispatching model considering energy-saving risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 22-29.
- [6] 朱泽磊, 周京阳, 潘毅, 等. 考虑电力电量平衡的安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 168-176.  
ZHU Zelei, ZHOU Jingyang, PAN Yi, et al. Security constrained economic dispatch considering balance of electric power and energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 168-176.
- [7] 周斌, 宋艳, 李金茗, 等. 基于多群组均衡协同搜索的多目标优化发电调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 181-188.  
ZHOU Bin, SONG Yan, LI Jinming, et al. Multiobjective optimal generation dispatch using equilibria-based multi-group synergistic searching algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 181-188.
- [8] 胡飞虎, 李威, 冯轩, 等. 基于不同目标的电网分区域调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 22-28.  
HU Feihu, LI Wei, FENG Xuan, et al. Research of sub-regional grid dispatching based on different objectives[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 22-28.
- [9] 许丹, 夏少连, 丁强, 等. 基于启发式混合整数规划法求解大规模机组组合问题[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 1-6, 13.  
XU Dan, XIA Shaolian, DING Qiang, et al. Fast unit commitment based on heuristic mixed integer programming[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 1-6, 13.
- [10] 谢昶, 刘文颖, 文晶, 等. 基于多数据源的日前预报潮流自动生成方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 87-92.  
XIE Chang, LIU Wenying, WEN Jing, et al. Auto-generation method of day-ahead forecast power flow based on multiple data sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 87-92.
- [11] 林毅, 孙宏斌, 吴文传, 等. 日前计划安全校核中计划潮流自动生成技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 68-73.  
LIN Yi, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. A schedule power flow auto generating technology in day-ahead security validation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 68-73.
- [12] 王毅, 侯俊贤, 马世英, 等. 用于调度计划安全稳定校核的潮流数据自动整合调整方法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 100-104.  
WANG Yi, HOU Junxian, MA Shiyong, et al. A method of automatic integration and regulation of power flow data for security and stability check of generation scheduling analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 100-104.
- [13] 赵晋泉, 叶君玲, 邓勇. 直流潮流与交流潮流的对比分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 147-152.  
ZHAO Jinquan, YE Junling, DENG Yong. Comparative analysis on DC power flow and AC power flow[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 147-152.
- [14] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 准稳态灵敏度的分析方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 9-13.  
SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. New sensitivity analysis method under quasi-steady-state for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 9-13.

收稿日期: 2015-04-26; 修回日期: 2015-11-04

作者简介:

黄国栋(1988-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统经济调度; E-mail: hgd2088@126.com

崔 晖(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与优化、节能经济调度等方面的研究工作;

许 丹(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事节能经济调度研究。

(编辑 魏小丽)