

DOI: 10.7667/PSPC160459

考虑静态电压稳定约束的低网损发电权交易优化

杨胡萍¹, 严飞飞¹, 张力², 李辉³

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 国网江西省电力公司萍乡分公司, 江西 南昌 330031;
3. 国网浙江省电力公司台州分公司, 浙江 台州 318000)

摘要: 发电权交易的目的是减小碳排放量和追求经济效益最大化。在发电权交易的过程中, 发电机组的有功出力变化会影响系统潮流的变化, 从而产生负荷裕度变小、碳排放量变大、网损变大等一系列问题。为解决以上问题, 提出一种在满足碳排放量和静态电压稳定约束下, 以网损最优为目标的发电权交易优化模型。采用约束松弛变量策略的中心校正内点法对该模型进行求解, 并将网损和有功出力转换成煤耗直观体现节能减排目的。以 IEEE30、IEEE39、IEEE57、IEEE118 系统进行算例验证, 算例结果表明该模型具有一定的实用性和有效性。

关键词: 发电权交易; 负荷裕度; 碳排放量; 网损; 静态电压稳定; 内点法

Optimization of low network loss generation right transaction considering steady state voltage stability constraint

YANG Huping¹, YAN Feifei¹, ZHANG Li², LI Hui³

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Grid Jiangxi Electric Power Company Pingxiang Branch, Nanchang 330031, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Company Taizhou Branch, Taizhou 318000, China)

Abstract: The target of generation right transaction is to reduce carbon emission and pursuit the maximum of economic benefit. In the process of generation right transaction, the changes of genset active power output will affect system power flow, resulting in small load margin, high carbon emission, high network loss and a series of questions. In allusion to the problems, a generation transaction model, in which the preset emission reduction is taken as the constraint and under the premise of ensuring the secure operation and static voltage stability of power system the optimal network loss of power system is taken as the objective, is proposed. The proposed model is solved by constraint slack variable based centrality correction interior point algorithm, and the network loss and active power output would be translated as coal consumption to reflect the purpose of energy-saving emission reduction directly. The practicability and effectiveness of the proposed method are validated by simulation results of IEEE 30-bus system, IEEE 39-bus system, IEEE 57-bus system and IEEE 118-bus system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367014).

Key words: generation right transaction; load margin; carbon emission; network loss; static voltage stability; interior point algorithm

0 引言

近年来, 由于环境问题的剧增, 电力系统的环保性也备受关注, 所以发电环节的节能降耗已成为建设节约型社会和减少温室气体排放的基本能源政策。发电权交易可通过市场的手段, 引导和促使高

能耗、高污染机组将其合同电量出售给低能耗、低污染的机组, 是实现资源优化、降耗减排的一种非常有效的方式^[1]。然而近几年关于网损方面的研究都侧重于网损分摊的问题, 而极少考虑降低网损^[2-3]。

文献[4]在建立发电权交易模型的过程中, 引入了新的交易变量(煤耗率), 用实际电网数据求解模型, 说明发电权交易能达到降低煤耗的目的。所以

发电权交易将成为电网可持续发展的必然趋势。近几年专家学者们提出的许多发电权交易模型普遍存在的问题,就是未考虑发电权交易造成的网损变化。

文献[5]只是提出以一种在发电权交易中,产生网损增量的一种计算方法,并没有对网损最优化的问题进行研究。文献[6]提出一种考虑网损的发电权交易模型,采用机组网损分摊率修正用户的报价,从而减小了网损率。但对该模型求解时并没有考虑到静态电压稳定约束以及碳排放约束,不满足交易模型的环保性和稳定性。文献[7]提出一种发电权交易阻塞管理模型,引入网损煤耗折算因子将网损折算到节能量中来考虑,综合实现节能减耗的目标。但该模型只对电量、交易价格、输电量以及交易电量平衡有约束,研究重点偏向于交易过程中,而并未考虑交易之后电网的稳定性以及交易过程中的碳排放约束。文献[8]提出将网损成本计入交易社会效益中来考虑的发电权交易优化模型,侧重点在于交易的总成本的成本计算,而并未单独考虑过网损优化的问题。

发电权交易不仅仅是要满足碳排放的环保性,还要保证系统运行的稳定性,所以考虑静态电压稳定是必不可少的条件。目前发电权交易模型所用的方法没有系统地把碳排放量、静态电压稳定以及网损3个元素联系起来。因此,本文将对碳排放量约束以及静态电压稳定约束进行深入研究,实现网损最优的目的。

1 发电权交易报价方式

文献[9]利用申报电量来判断出让方和受让方,提出了一种根据申报电量和发电报价信息进行撮合交易的发电权交易方式。本文也是在这种交易报价方式的基础上对节能降损问题进行研究,在此不对发电权交易报价方式做过多的阐述。在集中撮合交易中,为了达成双边自愿交易的目的,必须满足以下报价约束。

$$P_{S_i} \geq P_{B_j} \quad (1)$$

式中: P_{S_i} 表示出让方报价; P_{B_j} 表示受让方报价。假设有 m 个出让方, n 个受让方, 则 $i \in m, j \in n$ 。

2 优化模型

在以上所提的撮合交易的发电权交易方式下,为达到供电公司的利益目标,应实现网损的最优化。传统的考虑网损的发电权交易模型都是将网损计入成本中,然后只是在一些基本的电量、电价等约束下实现网损最优的交易模式。

发电权交易过程中引起系统的潮流变化会影响电网的负荷裕度,继而降低静态电压稳定,所以在建立发电权交易模型的过程中,必须考虑静态电压稳定的约束。

进入21世纪以来,节能环保一直是各行各业备受关注的课题。为提高电力系统的环保性,发电环节的碳排放量问题也被政府所重视。因此,为了提高模型的环保性,碳排放量约束也是必不可少的。

2.1 优化目标

网损的计算方式就是发电机组有功出力的总和与系统有功负荷总和的差值。但在发生交易时,会引起有功负荷以及发电机有功出力的变化。在此,系统中的每个可控发电机代表一个发电厂,同时为了把问题简化,设结算时间为1h。所以建立优化模型为

$$\min P_{\text{loss}} = (\mathbf{e}_1^T \mathbf{P}_{g0} + \mathbf{e}_2^T \mathbf{P}_{gp}) - (\mathbf{e}_3^T \mathbf{P}_{d0} + \mathbf{e}_4^T \lambda_p \mathbf{b}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{e}_1^T 为 m 维全为1的行向量,其中 m 为系统的总发电机数; \mathbf{P}_{g0} 为系统所有发电机组在初始运行点的有功出力列向量; \mathbf{e}_2^T 为 n 维全为1的行向量,其中 n 为系统的可控发电机组数; \mathbf{P}_{gp} 为进行交易后可控发电机相对于初始运行点的有功出力增量列向量; \mathbf{e}_3^T 为 s 维全为1的行向量,其中 s 为系统所有的负荷点数; \mathbf{P}_{d0} 为初始运行点系统所有负荷点的负荷列向量; \mathbf{e}_4^T 为 t 维全为1的行向量,其中 t 为系统所有的实际负荷点数; \mathbf{b} 为负荷增长方式, λ_p 为系统在负荷高峰点处的负荷增长因子; $\lambda_p \mathbf{b}$ 为系统实际负荷点由初始运行点到负荷高峰点的有功负荷增量。

2.2 基本约束条件

系统模型的基本约束条件如下。

1) 对于发电权交易优化问题,考虑系统的潮流安全约束是很值得研究的内容^[10],也是研究网络问题的必要约束条件。系统运行约束,即潮流方程约束方程为

$$\mathbf{L}_0 + \mathbf{G}(\mathbf{P}_{g0}) + \mathbf{l}_p \mathbf{G}(\mathbf{P}_{gp}) - \lambda_p \mathbf{b} - \mathbf{f}(\mathbf{x}_p) = \mathbf{0} \quad (3)$$

式中: \mathbf{L}_0 为在初始运行点系统节点注入功率的列向量; $\mathbf{G}(\cdot)$ 为可控发电机组有功出力向量到节点注入功率向量的扩展映射; \mathbf{l}_p 为系统在负荷高峰点处可控发电机组的出力因子; $\mathbf{l}_p \mathbf{G}(\mathbf{P}_{gp})$ 为系统在该点的有功出力增量; $\mathbf{f}(\cdot)$ 为系统节点注入功率的计算表达式; \mathbf{x}_p 为系统负荷高峰点的状态变量,包括电压幅值和相角。

2) 负荷高峰点发电机有功、无功出力和节点电压幅值和约束

$$\mathbf{P}_{g\min} \leq \mathbf{P}_{g0} + \mathbf{P}_{gp} \leq \mathbf{P}_{g\max} \quad (4)$$

$$Q_{gmin} \leq Q_{gp} \leq Q_{gmax} \quad (5)$$

$$V_{pmin} \leq V_p \leq V_{pmax} \quad (6)$$

式中: P_{gmax}, P_{gmin} 分别表示负荷高峰点发电机组有功出力上、下限; Q_{gmax}, Q_{gmin} 分别表示负荷高峰点发电机组无功出力上、下限, Q_{gp} 是负荷高峰点发电机组无功出力; V_{pmax}, V_{pmin} 分别表示负荷高峰点发电机组无功出力上、下限; V_p 是负荷高峰点节点电压幅值。

3) 负荷高峰点时系统支路电流的负荷约束

$$|I_{ij}(x_p)|^2 \leq I_{ijmax}^2 \quad (7)$$

$$|I_{ji}(x_p)|^2 \leq I_{jimax}^2 \quad (8)$$

式中, $I_{ij}(\cdot)$ 为流过 i 节点和 j 节点所在支路电流的幅值。

2.3 碳排放约束

在考虑碳排放量的问题时, 需要引入碳排放额度 C_e , 作为发电厂的碳排放约束值。碳排放额度的具体计算方式可见文献[11], 此处也不再赘述。本模型所采用的单位标准煤允许的碳排放量 C_1 设为 1.9774 t, 火电供电煤耗率设为 0.325 t 标准煤/MWh; 则系统的碳排放额度为

$$C_e = C_1 \cdot k_1 \cdot P_d = 1.9774 \times 0.325 \cdot P_d \quad (9)$$

式中, P_d 表示系统负荷的总和。

系统的碳排放量表达式为

$$m_e = k_e \cdot P_{gp} \quad (10)$$

式中: m_e 表示碳排放量; k_e 表示机组的单位碳排放强度的行向量。

所以系统的碳排放约束为

$$k_e \cdot P_{gp} \leq C_e \quad (11)$$

碳排放强度的大小与发电机组的类型有关, 大燃煤、小燃煤以及燃气机组的碳排放强度分别为 0.75 t/MWh、1.15 t/MWh 和 0.40 t/MWh。

2.4 静态电压稳定约束

电力系统常用的静态电压稳定指标有很多种, 一般把负荷裕度作为分析指标^[12](其他指标都有很多的缺陷^[13])衡量电压稳定的标准。在进行发电权交易的过程中, 导致系统的潮流变化, 为了保证系统能够安全地过负荷高峰点, 应对系统的负荷裕度设定一个阈值^[14], 对其进行约束。

1) 电压稳定临界点的潮流方程约束

$$L_0 + G(P_{g0}) + l_c G(P_{gp}) - \lambda_c b - f(x_c) = 0 \quad (12)$$

式中: l_c 为系统在电压稳定临界点处可控发电机组的出力因子; $l_c G(P_{gp})$ 为系统在该点的有功出力增量; x_c 为临界点的状态变量, 包括电压幅值和相角。

2) 系统临界点发电机组的无功出力约束

$$Q_{gmin} \leq Q_{gc} \leq Q_{gmax} \quad (13)$$

式中, Q_{gc} 是系统临界点发电机组无功出力。

3) 负荷裕度约束

$$\lambda_{ref} \leq \lambda_c \quad (14)$$

式中: λ_{ref} 表示设定的最小负荷裕度阈值; λ_c 表示电压临界点系统的负荷裕度。

2.5 建立优化模型

综上所述, 建立在碳排放量和静态电压稳定为约束下, 以网损最优为目标的发电权交易模型为

$$\text{Obj: } \min P_{loss} \quad (15)$$

$$\text{s.t.: } \begin{cases} (2) \sim (8) \\ (11) \\ (12) \sim (14) \end{cases} \quad (16)$$

3 模型求解

对于本模型的这种大数据、非线性、等式约束与不等式约束同时存在, 且约束条件偏多的问题, 采用内点法求解模型更能体现出碳排放和静态电压稳定约束的影响。但是普通的内点法在处理本模型时, 可能存在因互补对比例相差太大所造成的数值问题。所以采用基于约束松弛变量策略的中心校正内点法对该模型进行求解, 该算法的详细分析见文献[15]。然后将求解出来的网损和机组出力转换成煤耗量, 更直观地体现出本模型的节能减排能力。

$$Q_C = (\gamma P_G + \alpha P_{loss}) \cdot t \quad (17)$$

式中: Q_C 为综合煤耗量; P_G 为机组有功出力总和; t 为时间; γ 为机组供电煤耗率, α 为网损折算因子 本文设定 $\alpha = \gamma = k_e$ 。

4 算例分析

采用将网损和有功出力转换成煤耗, 并计算节煤量的方式。直观体现本模型的节能降耗的有效性。

在 IEEE30、39、57 和 118 节点系统中对所提模型和算法进行验证。对于以上算例, 设负荷裕度阈值 λ_{ref} 分别为 0.9、1.35、0.95 和 1.05; 设高峰负荷点的负荷裕度 $\lambda_p = 0.1$, 系统发电机组有功出力总和 P_g , 系统总的负荷 P_d , 系统网损 P_{loss} , Q_C 为综合煤耗量, 系统网损率 WSL , 网损率能够很形象地说明网络损耗与有功输出的关系, 系统碳排放量 m_e ; 系统在未受约束前的负荷裕度 λ_{c0} ; 系统初值如表 1。

由表 1 中数据可知任何测试系统的原始碳排放量都超过了该系统的碳排放额度; 虽然临界点的负荷裕度大于负荷高峰点所设定的值, 但除了

IEEE118 系统, 其他测试系统的负荷裕度值都小于所设定的阈值。

表 1 测试系统原始计算数据

Table 1 Original calculation parameters of test system

系统	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	$WSL(\%)$	$C_g(\text{t/h})$	$m_c(\text{t/h})$	λ_{ref}	λ_{c0}
IEEE30	7.09	2.33	182.13	252.52	0.9	0.85
IEEE39	42.74	0.69	3952.40	4887.60	1.35	0.67
IEEE57	27.86	2.18	803.83	866.50	0.95	0.62
IEEE118	132.90	3.50	2357.30	3624.00	1.05	1.35

在发电权交易的过程中, 有功出力、网损和有功负荷在交易中都是动态的, 所以优化模型的综合煤耗也应该进行动态比较。即用原始节点系统的网损率计算优化模型的网损, 再与有功出力综合转换成煤耗计算节煤量。

$$P_l = P_G \cdot W_0 \quad (18)$$

$$\rho = Q_{C0} - Q_C \quad (19)$$

式中: W_0 表示原始系统网损率; P_l 表示动态网损, Q_{C0} 表示未优化系统的综合煤耗; Q_C 表示优化模型的综合煤耗; ρ 表示节煤量。所以下文分别对两种约束下的优化方案进行研究和讨论。

1) 只考虑碳排放约束下的优化方案

由于发电权交易会产潮流的变化, 所以系统的总负荷也会变化, 从而改变了碳排放额度。在碳排放单目标约束下的优化方案如表 2 所示。

表 2 只考虑碳排放约束下的优化方案

Table 2 Optimal project under carbon emission constraint

系统	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	$WSL(\%)$	ρ/t	$C_g(\text{t/h})$	$m_c(\text{t/h})$	λ_c	λ_{ref}
IEEE30	4.92	1.55	0.80	291.41	278.99	0.63	0.85
IEEE39	38.13	0.56	2.88	5525.07	5299.64	0.29	0.67
IEEE57	23.94	1.79	1.70	916.80	910.23	0.58	0.62
IEEE118	101.31	2.15	20.67	3889.48	3820.75	0.31	1.35

由表 2 可知, 考虑了碳排放约束之后, 测试系统的碳排放量都未超过额度, 并且降低了网损和煤耗量。但是系统的负荷裕度却远远降低了, 存在运行风险, 特别是 IEEE39 和 IEEE118 系统, 只有 19% 和 21% 的负荷裕度, 稍有动荡就会造成电压奔溃的悲剧。

2) 只考虑静态电压稳定约束下的优化方案

由上文所设定的阈值对负荷裕度进行约束。优化方案如表 3 所示。

由表 3 可知, 在只考虑静态电压稳定约束下的优化方案中, 虽然负荷裕度满足了要求, 且煤耗量有所节约, 但是很明显的是所有系统的碳排放量都超过了规定的额度, 严重降低了模型的环保性。

表 3 只考虑静态电压稳定约束下的优化方案

Table 3 Optimal project under steady state voltage stability constraint

系统	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	$WSL(\%)$	ρ/t	$C_g(\text{t/h})$	$m_c(\text{t/h})$	λ_c	λ_{ref}
IEEE30	5.65	1.78	0.57	200.34	285.79	0.91	0.9
IEEE39	48.28	0.68	0.23	4321.30	5354.55	1.35	1.35
IEEE57	24.32	1.82	1.56	845.34	916.05	0.98	0.95
IEEE118	154.75	3.28	3.37	2590.80	3863.77	1.05	1.05

3) 双约束下的优化方案

从以上的研究发现, 碳排放量和静态电压稳定两个约束条件缺一不可, 因此, 下文将研究在双约束条件下的优化方案, 如表 4 所示。

表 4 考虑碳排放和静态电压稳定约束下的优化方案

Table 4 Optimal project under carbon emission and steady state voltage stability constraints

系统	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	$WSL(\%)$	ρ/t	$C_g(\text{t/h})$	$m_c(\text{t/h})$	λ_c	λ_{ref}
IEEE30	5.69	1.66	0.75	283.57	280.63	0.90	0.9
IEEE39	53.43	0.62	1.96	5562.19	5313.80	1.35	1.35
IEEE57	26.32	1.81	1.75	915.38	913.99	0.95	0.95
IEEE118	162.33	2.95	9.84	3895.91	3871.19	1.05	1.05

由表 4 可知, 在双约束条件下的优化方案, 测试系统中的碳排放量以及负荷裕度都满足要求, 并且也降低了系统的煤耗量, 保证了模型的环保性和稳定性。

对比表格数据可以发现, 表 4 中与表 2 中的碳排放量所差无几, 表 4 与表 2 中的负荷裕度基本一致, 且双约束下的网损值比单约束下的都大。由此可以得知, 增加系统的少量网损不仅可以增强系统的稳定性, 还能挖掘系统的减排能力。但是网损率的确有所降低且有一定的节煤量, 充分证明了本模型的正确性和有效性。

5 结论

本文所提出的考虑碳排放与静态电压稳定约束下的低网损发电权交易优化模型, 不仅能在发电侧减少碳排放量和煤耗量, 为发电厂增加效益, 提高电厂的环保性; 还能在输电侧降低网损, 为供电公司提高效益, 增强系统的稳定性。该模型对节能减排大目标的实现具有深远的意义。

参考文献

- [1] 张显, 耿建, 庞博, 等. 发电权交易在中国节能减排中的应用及分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 87-90.
ZHANG Xian, GENG Jian, PANG Bo, et al. Application

- and analysis of generation right trade in energy-saving and emission reduction in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 87-90.
- [2] 胡福年, 刘亚军, 胥璐. 基于同胚映射和微元分析的网损交叉分摊方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 96-102.
HU Funian, LIU Yajun, XU Lu. Research on the cross item allocation of power losses based on homeomorphism mapping and microelement methods[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 96-102.
- [3] 王铮, 刘创华, 魏珍, 等. 基于叠加定理和 Aumann-Shapley法的发电权交易网损分摊[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 13-22.
WANG Zheng, LIU Chuanghua, WEI Zhen, et al. Losses allocation resulting from generation rights trade based on superposition principle and Aumann-Shapley method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 13-22.
- [4] 郑欣, 蒋传文, 李磊, 等. 基于能耗和效益最优的发电权节能降耗分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 39-42.
ZHENG Xin, JIANG Chuanwen, LI Lei, et al. Analysis of generation rights trade based on optimization of energy-saving and efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 39-42.
- [5] 于娜, 马凯, 黄大为, 等. 发电权交易中增量网损的计算方法研究[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(1/2): 51-55.
YU Na, MA Kai, HUANG Dawei, et al. Research on calculation method of generation rights trading incremental network loss[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2013, 33(1/2): 51-55.
- [6] 卢志刚, 陈静思. 计及网损的发电权交易报价修正方法[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 146-149.
LU Zhigang, CHEN Jingsi. A method to modify quoted price of generation right tradeoff considering network loss[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 146-149.
- [7] 王雁凌, 邱小燕, 许传龙. 以节能降耗为目标的发电权交易阻塞管理模型[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 272-276.
WANG Yanling, QIU Xiaoyan, XU Chuanlong. Congestion management of generation rights trade based on energy conservation[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 272-276.
- [8] 杨胡萍, 占思凯, 严飞飞, 等. 基于NBI法的发电权交易多目标优化[J]. 现代电力, 2016, 33(1): 87-94.
YANG Huping, ZHAN Sikai, YAN Feifei, et al. Multi-objective optimization of generation rights trade based on NBI method[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(1): 87-94.
- [9] 黄大为, 刘志向, 杨春雨, 等. 计及网损成本的发电权交易模式[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 38-42.
HUANG Dawei, LIU Zhixiang, YANG Chunyu, et al. Generation right trading model considering transmission losses cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 38-42.
- [10] 文旭, 郭琳, 王俊梅. 面向节能减排的电力系统发购电计划研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 136-144.
WEN Xu, GUO Lin, WANG Junmei. Overview of power dispatch and purchasing plan in power system from energy-saving and emission-reducing[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 136-144.
- [11] 杨胡萍, 左士伟, 陈欢. 碳排放约束下考虑静态电压稳定的发电权交易优化[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3011-3015.
YANG Huping, ZUO Shiwei, CHEN Huan. Optimization of generation right transaction considering steady state voltage stability under carbon emission constraint[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3011-3015.
- [12] 董雷, 张昭, 蒲天娇, 等. 基于PMU量测信息的电压稳定在线评估指标[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 1-6.
DONG Lei, ZHANG Zhao, PU Tianjiao, et al. An online voltage stability index based on measuring information of phasor measurement unit[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 1-6.
- [13] 朱永强, 刘光焘, 廖廷坚, 等. 计及负荷电压静态特性的电力系统最小负荷裕度的快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 44(6): 23-28.
ZHU Yongqiang, LIU Guangye, LIAO Tingjian, et al. Rapid assessment of power system minimum load margin considering load voltage static characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(6): 23-28.
- [14] 熊宁, 吴越, 蔡恒, 等. 考虑静态电压稳定的低碳电力调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 62-67.
XIONG Ning, WU Yue, CAI Heng, et al. Low carbon generation dispatch method considering static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 62-67.
- [15] 熊宁, 张魏, 黄金海, 等. 基于约束松弛变量策略的中心校正内点法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 20-25.
XIONG Ning, ZHANG Wei, HUANG Jinhai, et al. Centrality correction interior point method based on constrained slack variables strategy[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 20-25.

收稿日期: 2016-04-02; 修回日期: 2016-07-08

作者简介:

杨胡萍(1964-), 女, 硕士, 教授, 从事电力经济分析、电力市场运营理论的研究工作; E-mail: yhping123@163.com

严飞飞(1992-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力市场运营理论的研究。E-mail: 627921868@qq.com

(编辑 葛艳娜)