

电力系统安全经济调度网损协调优化方法

王楠, 张粒子, 黄巍, 舒隽

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Coordinative Optimization of Network Loss in Security-Constrained Economic Dispatching

WANG Nan, ZHANG Lizhi, HUANG Wei, SHU Jun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: It is impossible to incarnate the impact of generation units on network loss by DC optimal power flow algorithm widely used in security-constrained economic dispatching of power system, for this reason, a method to coordinatively optimize network loss for security-constrained economic dispatching is proposed. The price factors and coordination coefficients of network loss is led into objective function and an improved DC power flow model is built to implement optimal distribution of power load among generation units; then actual network loss is calculated by AC power flow calculation and by use of incremental DC power flow model the network loss is reasonably allocated among generation units; finally, the price factors and coordination coefficients of network loss are modified by AC-DC iteration to optimize network loss allocation scheme. The feasibility of the proposed method is verified by calculation results of IEEE 14-bus system and IEEE 118-bus system and the calculation results adequately approximate to those calculated by AC optimal power flow method, so the proposed method conforms to operation conditions of actual power systems.

KEY WORDS: security-constrained economic dispatch; DC optimal power flow algorithm; AC optimal power flow algorithm; AC-DC iterative algorithm; network loss; incremental network loss

摘要: 安全经济调度领域广泛采用的直流最优潮流算法无法体现机组对网损的影响, 为此提出了电力系统安全经济调度的网损协调优化方法。将网损价格因子和网损协调系数引入目标函数, 建立了改进直流潮流模型, 实现了负荷在机组间的最优分配; 利用交流潮流方法计算系统实际网损, 并利用增量直流潮流模型将网损在机组间进行合理分摊; 最后利用交直流迭代思想修正网损价格因子和网损协调系数以优化网损分配方案。IEEE 14节点和 IEEE 118节点算例验证了该方法的可行性, 算例结果充分逼近了交流最优潮流的计算结果, 符合实际系统运行状况。

关键词: 安全经济调度; 直流最优潮流算法; 交流最优潮流

算法; 交直流迭代算法; 网损; 网损微增率

0 引言

20世纪60年代, 法国学者 Carpentier 提出的电力系统最优潮流方法为电力系统安全经济调度提供了新方法, 并已逐渐成为研究重点^[1-4]。根据网络模型处理方式, 最优潮流方法可分为交流最优潮流方法和直流最优潮流方法^[5]。交流最优潮流方法采用精确网络模型, 能够精确计算系统网损, 但由于采用模型为非线性规划模型, 因而该方法在收敛性及计算效率等方面存在不足, 限制了该方法的应用范围。电力系统有功功率与无功功率之间存在弱耦合关系, 在此基础上直流最优潮流方法对电力系统模型进行了合理简化, 进而可通过现有成熟算法对模型进行解算^[6-7], 目前直流最优潮流方法已在安全经济调度领域获得了广泛应用, 但直流最优潮流方法忽略了系统网损, 可能导致结果与实际运行情况不符^[8]。

许多学者对如何将网损引入直流最优潮流模型进行了大量研究: 一种思路是通过网损微增率建立网损因子^[9-11](经典经济调度中称之为网损修正系数^[12-13]), 进而对目标函数进行修正, 并将网损作为常数加入等式约束, 但由于网损微增率受系统有功功率分配结果影响, 机组出力的改变易导致修正后网损微增率与实际情况不符, 而且由于网损微增率反映机组对网损的边际影响, 所以存在利用断面结果计算网损微增率是否最优的问题; 另一种思路是通过网损分摊修正目标函数^[14-15], 该类方法(如潮流摄动法、潮流追踪法等)^[16]易受网损分摊方案影响, 这也限制了该类方法的计算精度及实用性。

在直流最优潮流方法基础上, 本文提出了电力

系统安全经济调度网损协调优化方法，将安全经济调度问题分解为机组负荷分配及网损分摊 2 个层次，该方法保留了直流最优潮流方法在计算效率上的优势，解决了直流最优潮流方法无法考虑机组对网损影响的问题。

1 改进直流潮流模型

由于电力系统存在网损，实际发电成本 C 包含了为满足负荷供电需求所产生的发电成本 C^D 以及为补偿系统网损所产生的网损成本 C^L ，同样机组优化出力向量 \mathbf{P}_G 也可认为由负荷分配出力向量 \mathbf{P}_G^D 和网损分摊出力向量 \mathbf{P}_G^L 组成，则

$$\begin{cases} \mathbf{P}_G = \mathbf{P}_G^D + \mathbf{P}_G^L \\ C = C^D + C^L = f(\mathbf{P}_G) = f(\mathbf{P}_G^D + \mathbf{P}_G^L) \\ C^D = f(\mathbf{P}_G^D) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f(\mathbf{P}_G)$ 为机组总发电成本函数。本文认为机组发电成本为输出功率的二次函数，忽略机组常数项成本参数后，

$$f(\mathbf{P}_G) = \mathbf{P}_G^T \mathbf{A} \mathbf{P}_G + \mathbf{B}^T \mathbf{P}_G \quad (2)$$

式中： \mathbf{A} 为机组二次成本参数建立的对角阵； \mathbf{B} 为机组一次成本参数向量。

P_L^{ac} 为交流潮流模型下系统的实际有功网损，可通过潮流计算得到：

$$P_L^{\text{ac}} = \sum_{l=1}^L F_l^2 R_l = \mathbf{F}^T \mathbf{R} \mathbf{F} \quad (3)$$

式中： \mathbf{F} 为线路有功潮流向量； F_l 为 \mathbf{F} 中第 l 个元素； \mathbf{R} 为以支路电阻建立的对角阵； R_l 为 \mathbf{R} 中第 l 行第 l 列元素； L 为支路数。

在直流潮流模型中，支路潮流可表示为节点注入有功功率的线性函数，因此直流最优潮流模型中网损 (P_L^{dc}) 及网损微增率 ($\partial P_L^{\text{dc}} / \partial \mathbf{P}$) 为

$$P_L^{\text{dc}} = (\mathbf{S}_F \mathbf{P})^T \mathbf{R} (\mathbf{S}_F \mathbf{P}) = \mathbf{P}^T (\mathbf{S}_F^T \mathbf{R} \mathbf{S}_F) \mathbf{P} \quad (4)$$

$$\partial P_L^{\text{dc}} / \partial \mathbf{P} = 2(\mathbf{S}_F^T \mathbf{R} \mathbf{S}_F) \mathbf{P} \quad (5)$$

式中： \mathbf{P} 为节点注入功率向量 (\mathbf{P} 中元素 $P_i = P_{Gi} - P_{Di}$ ， P_{Gi} 为机组有功出力向量 \mathbf{P}_G 中元素， P_{Di} 为负荷向量 \mathbf{P}_D 中元素)； \mathbf{S}_F 为节点支路转移因子矩阵 (s_{ij} 为节点 i 对支路 j 的转移因子)。由式(5)可知，直流潮流模型中的网损量以及各节点注入功率对网络损耗的影响仅与网络拓扑、线路参数和节点注入功率有关。在给定系统负荷情况下，直流网损可表示为机组有功出力的函数：

$$P_L^{\text{dc}} = \mu(\mathbf{P}_G) = \mathbf{P}_G^T (\mathbf{N}_G \mathbf{S}_F^T \mathbf{R} \mathbf{S}_F \mathbf{N}_G^T) \mathbf{P}_G - (2\mathbf{P}_D^T \mathbf{N}_D \mathbf{S}_F^T \mathbf{R} \mathbf{S}_F \mathbf{N}_G^T) \mathbf{P}_G + C_{\text{onst}} \quad (6)$$

式中： \mathbf{N}_G 为节点机组关联矩阵； \mathbf{N}_D 为节点负荷关联矩阵； $C_{\text{onst}} = \mathbf{P}_D^T \mathbf{N}_D \mathbf{S}_F^T \mathbf{R} \mathbf{S}_F \mathbf{N}_D^T \mathbf{P}_D$ 为常数。式(6)反映了各机组注入功率对网损的非线性影响。

λ_L 为网损价格因子，表示单位网损均价，即当前系统运行状态下为平衡单位网损量所需付出的平均成本，则

$$\lambda_L = C^L / P_L^{\text{ac}} = (C - C^D) / P_L^{\text{ac}} \quad (7)$$

通过式(6)得到的直流潮流模型网损忽略了系统无功，而系统无功注入会直接影响电压水平，从而影响网损，因此由直流潮流模型计算所得网损与由交流潮流模型计算所得实际网损存在偏差。本文认为以上 2 种模型计算所得网损间存在线性关系，为此定义网损协调系数 σ_L ：

$$\sigma_L = P_L^{\text{ac}} / P_L^{\text{dc}} \quad (8)$$

传统的直流潮流模型仅以负荷发电成本最小为目标进行优化，模型无法体现各机组对网损的影响，为此本文将网损价格因子、网损协调系数引入模型目标函数，建立以负荷发电成本及网损成本综合最小的改进直流潮流模型：

$$\min f(\mathbf{P}_G^D) + \lambda_L \sigma_L \mu(\mathbf{P}_G^D) = (\mathbf{P}_G^D)^T \mathbf{H} \mathbf{P}_G^D + \mathbf{F}^T \mathbf{P}_G^D \quad (9)$$

约束条件为

$$\mathbf{e}_G^T \mathbf{P}_G^D - \mathbf{e}_D^T \mathbf{P}_D = 0 \quad (10)$$

$$-\bar{\mathbf{L}} \leq \mathbf{S}_F \mathbf{N}_G \mathbf{P}_G^D - \mathbf{S}_F \mathbf{N}_D \mathbf{P}_D \leq \bar{\mathbf{L}} \quad (11)$$

$$\underline{\mathbf{P}} \leq \mathbf{P}_G^D \leq \bar{\mathbf{P}} \quad (12)$$

式中： $\mathbf{H} = \mathbf{A} + \lambda_L \sigma_L \mathbf{N}_G \mathbf{S}_F^T \mathbf{R} \mathbf{S}_F \mathbf{N}_G^T$ ； $\mathbf{F} = \mathbf{B} - 2\lambda_L \sigma_L \mathbf{P}_D^T \cdot \mathbf{N}_D \mathbf{S}_F^T \mathbf{R} \mathbf{S}_F \mathbf{N}_G^T$ ； \mathbf{e}_G 、 \mathbf{e}_D 为单位列向量，其维数分为为机组数和负荷数； $\bar{\mathbf{L}}$ 为线路有功潮流传输极限向量； $\underline{\mathbf{P}}$ 为机组最小技术出力向量； $\bar{\mathbf{P}}$ 为机组最大技术出力向量。式(10)为不计网损的功率平衡约束条件，式(11)为直流潮流模型的系统网络约束条件，式(12)为机组出力上下限约束。由于 \mathbf{H} 为对称正定矩阵，所以目标函数为严格凸函数，该模型为典型的二次规划模型，可采用传统的二次规划算法进行求解。

改进直流潮流模型考虑了机组对网损的影响，利用网损价格因子和网损协调系数实现了直流网损与交流网损在价、量上的一致性。网损价格因子可使直流网损和交流网损保持网损电价的一致性，网损协调系数可保证直流网损和交流网损在网损电量上的一致性，并将发电成本及网损成本统一到经济性目标以进行综合优化，从而实现了真正意义上的发电成本最小化。但由于模型在等式约束中并未计及系统网损，所以该模型仅实现系统负荷在机组间的最优分配，无法实现系统网损的优化分配。

2 增量直流潮流模型

本文在改进直流潮流模型基础上建立增量直流潮流模型, 以实现系统网损的最优分配, 模型目标函数为

$$\min F(\mathbf{P}_G^L) = (\mathbf{P}_G^L)^T \mathbf{A} \mathbf{P}_G^L + (2\mathbf{A} \mathbf{P}_G^D + \mathbf{B})^T \mathbf{P}_G^L \quad (13)$$

约束条件为

$$\mathbf{e}_G^T \mathbf{P}_G^L = P_L^{\text{ac}} \quad (14)$$

$$\mathbf{L} - \mathbf{L} \leq \mathbf{S} \mathbf{F} \mathbf{N}_G \mathbf{P}_G^L \leq \bar{\mathbf{L}} - \mathbf{L} \quad (15)$$

$$0 \leq \mathbf{P}_G^L \leq \bar{\mathbf{P}} - \mathbf{P}_G \quad (16)$$

式中: \mathbf{P}_G^L 为机组网损分配向量, 为待优化变量; \mathbf{P}_G^D 为改进直流潮流模型优化后的机组负荷分配向量; \mathbf{L} 为改进直流潮流模型优化后的线路有功潮流向量, $\mathbf{L} = \mathbf{S}_F \mathbf{N}_G \mathbf{P}_G^D - \mathbf{S}_F \mathbf{N}_D \mathbf{P}_D$ 。

增量直流潮流模型以增量成本最小为目标, 考虑了线路传输安全约束及机组容量约束, 实现了机组网损量的最优分配。

3 基于交直流迭代思想协调网损

直流潮流模型计算效率高, 交流潮流模型能真实反映电力系统非线性特性, 为此本文利用交直流迭代思想实现直流潮流模型网损和交流潮流模型网损之间的协调。该方法利用改进直流潮流模型分配系统负荷, 以优化结果作为机组出力, 然后采用交流潮流方法计算系统实际网损, 并利用增量直流潮流模型将该网损在机组间进行分配, 并对网损价格因子及网损协调系数进行修正, 进而重新优化网损分配, 如此反复迭代, 直到网损不发生变化或变化小于计算停止的阈值时为止。算法流程见图1。

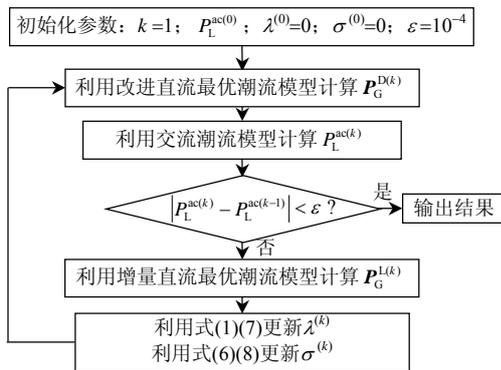


图1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow chart

4 算例分析

本文分别以 IEEE 14 节点和 118 节点 2 测试系统来验证本文算法的有效性。算例数据取自 MATPOWER 软件中的算例^[17]。

图2为 IEEE 14 节点测试系统下本文算法的收敛曲线。由图2可知, 本文算法经过1次迭代便可接近最优解, 经过6次迭代可达到稳定收敛, 保证了算法的收敛性以及计算效率。

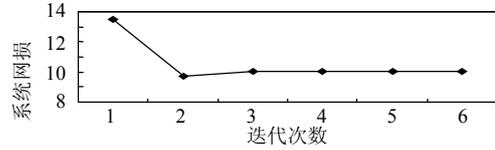


图2 算法收敛曲线

Fig. 2 Algorithm convergence curve

图3—4为迭代过程中网损价格因子和网损协调系数的变化曲线, 网损价格因子、网损协调系数通过交直流迭代后最终与系统实际运行状况相符, 实现了交流网损与直流网损在价、量上的一致性。

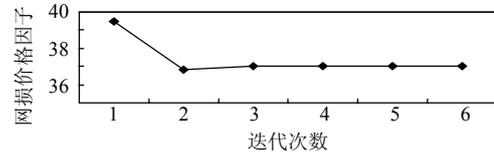


图3 网损价格因子

Fig. 3 Loss price factor

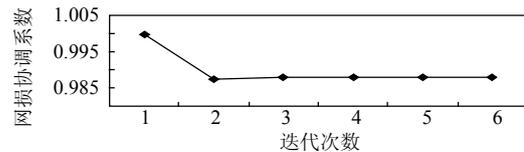


图4 网损协调系数

Fig. 4 Loss coordination coefficient

为验证本文算法的有效性, 将本文算法结果与基态网损修正最优潮流算法、网损修正最优潮流算法以及交流最优潮流算法结果进行了对比, 如表1所示。基态网损修正最优潮流算法以基态运行方式计算网损微增率, 进而修正机组成本参数, 并将基态网损加入等式约束后进行直流最优潮流优化; 最优网损修正最优潮流算法以交流最优潮流运行方式计算网损微增率, 修正机组成本参数, 并将交流最优潮流算法计算的网损加入等式约束后进行直流最优潮流优化。由表1可知, 网损修正算法由于采用网损边际量修正机组成本参数, 其计算精度依赖于机组有功功率分配结果精度, 在难以获取机组

表1 不同算法的优化结果对比

Tab. 1 Comparison of optimization results from different algorithms

算法	IEEE 14 节点系统		IEEE 118 节点系统	
	网损/MW	发电成本/USD	网损/MW	发电成本/USD
基态网损修正	8.000 0	8 101.60	67.580	130 313
最优网损修正	8.940 0	8 082.35	75.270	129 693
本文算法	10.050 0	8 085.30	82.102	129 666
交流最优潮流	9.287 2	8 081.52	77.380	129 660

最优有功功率分配结果时优化结果偏差较大; 本文算法不受机组有功功率分配结果影响, 并且非常逼近交流最优潮流算法优化结果。

为验证直流网损公式的合理性, 分别采用式(2)和转置雅克比法^[15]计算网损微增率, IEEE 118 节点系统各节点网损微增率如图 5 所示。由图 5 可知, 本文直流网损公式可精确表征各机组对系统网损的影响, 保证了改进直流潮流模型优化的合理性。

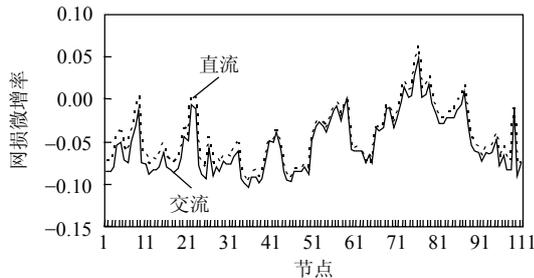


图 5 IEEE 118 系统各节点网损微增率

Fig. 5 Incremental network loss of IEEE 118 system nodes

5 结论

本文利用网损价格因子和网损协调系数将直流网损引入目标函数中, 建立了实现负荷发电成本及网损成本综合最优的改进直流潮流模型。针对改进直流最优潮流方法无法实现网损分配的问题, 建立了增量直流最优潮流进行网损的优化分配。通过交直流迭代修正网损价格因子、网损协调系数, 以优化系统网损分配结果。与网损修正方法相比, 本文算法不依赖于有功运行方式, 实现了真正意义上的发电成本最小化。本文方法保留了直流最优潮流的计算效率, 将非线性网损作为目标函数体现了电力系统的非线性特性, 可为安全经济调度网损协调优化提供参考。

参考文献

- [1] 袁贵川, 王建全, 韩祯祥. 电力市场下的最优潮流[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 13-17.
Yuan Guichuan, Wang Jianquan, Han Zhenxiang. Optimal power flow under electricity market[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 13-17(in Chinese).
- [2] 乐秀璠, 覃振成, 杨博, 等. 基于改进多中心-校正内点法的最优潮流[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 47-52.
Le Xiufan, Qin Zhencheng, Yang Bo, et al. Optimal power flow based on improved multiple centrality-correction interior point method[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 47-52(in Chinese).
- [3] Rabih A J. Optimal power flow using an extended conic quadratic formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1000-1008.
- [4] 杨波, 赵遵廉, 陈允平, 等. 一种求解最优潮流问题的改进粒子群优化算法. 电网技术, 2006, 30(11): 6-10.
Yang Bo, Zhao Zunlian, Chen Yunping, et al. An improved particle swarm optimization algorithm for optimal power flow problem[J].

- Power System Technology, 2006, 30(11): 6-10(in Chinese).
- [5] Korab R, Tomasik G. AC or DC OPF based LMP's in a competitive electricity market[C]/International Symposium CIGRE/IEEE PES. New Orleans, USA: IEEE, 2005.
- [6] 刘科研, 盛万兴, 李运华. 互联网的直流最优潮流分解算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 21-25.
Liu Keyan, Sheng Wanxing, LiYunhua. Research on decomposition algorithm of DC optimal power flow in large scale interconnection power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 21-25(in Chinese).
- [7] Ott A L. Experience with PJM market operation, system design and implementation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 528-534.
- [8] Overbye T, Cheng X, Sun YA. Comparison of the AC and DC power flow models for LMP calculations[C]/Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, USA: IEEE, 2004.
- [9] Li Fangxing, Pan Jiuping, Chao Henry. Marginal loss calculation in competitive electrical energy markets[C]/IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Hongkong, China: IEEE, 2004.
- [10] Li Fangxing, Bo Rui. DCOPTF-Based LMP simulation: algorithm, comparison with ACOPTF, and sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1475-1485.
- [11] Eugene Litvinov, Zheng Tongxin, Gary Rosenwald, et al. Marginal loss modeling in LMP calculation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 880-888.
- [12] 于尔铿. 现代电力系统经济调度[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986: 26-39.
- [13] 陈恳, 李小锐, 徐敏. 网损微增率新解法与转置雅可比矩阵法用于有功优化计算的比较[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 34-38.
Chen Ken, Li Xiaorui, Xu Min. Comparisons between new method and transposed jacobian matrix method for calculating incremental transmission losses in active power economic dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 34-38(in Chinese).
- [14] 王海霞, 李卫东, 陶家琪, 等. 东北区域电力市场发电报价网损修正算法[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 73-79.
Wang Haixia, Li Weidong, Tao Jiaqi, et al. A network loss modification algorithm for bidding prices in northeast China areal electricity market[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 73-79 (in Chinese).
- [15] 张宁, 陈慧坤, 骆晓明, 等. 广东电网节能发电调度计划模型与算法[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 11-15.
Zhang Ning, Chen Huikun, Luo Xiaoming, et al. Model and algorithm of energy-conservation based generation dispatching for Guangdong power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 11-15 (in Chinese).
- [16] Gross G, Tao S. A physical-flow-based approach to allocating transmission losses in a transaction framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 631-637.
- [17] Ray D Zimmerman, Carlos E Murillo-Sánchez, Deqiang(David) Gan. MATPOWER[EB/OL]. [2009-06-26]. <http://www.Pserc.cornell.edu/matpower/>.



王楠

收稿日期: 2010-04-26.

作者简介:

王楠(1983), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场、电力系统优化, E-mail: wangnan8387@163.com.

(编辑 徐梅)