

论等耗量微增率和等网损微增率与最优潮流的关系

王正风, 汤 伟, 吴 昊, 谢大为

(安徽省电力调度通信中心, 安徽 合肥 230022)

摘要: 等耗量微增率准则和等网损微增率准则是经典的电力系统经济运行准则。等耗量微增率准则是电力系统有功负荷分布的最优准则, 等网损微增率准则是电力系统无功电源分布的最优准则, 而电力系统最优潮流则是近年来经济的调度运行理论。从理论上对等耗量微增率和等网损微增率与最优潮流进行了分析和推导, 通过对目标函数的比较、约束条件的比较、物理含义的分析以及仿真算例的证明, 表明最优潮流包含了等耗量微增率和等网损微增率, 是这 2 个准则在电力系统中的进一步灵活运用。

关键词: 等耗量微增率; 等网损微增率; 最优潮流; 实时电价

中图分类号: TM 731

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0039-03

0 引言

考虑系统的经济因素, 20 世纪 60 年代末出现了一些经济调度理论, 例如最优分配有功负荷分布的等耗量微增率和无功电源最优分布的等网损微增率^[1-3]。等耗量微增率准则是指系统所有发电机组具有同样的耗量微增率时, 系统运行所需要的费用最小; 等网损微增率是指系统所有无功电源配置具有相同的网损微增率时, 系统网损最小。

随着电力系统规模扩大, 对计算速度和系统安全性提出了更高要求, 这些经典调度理论已不能满足要求。将电力系统的潮流计算和优化理论结合, 并且计及系统的各种约束条件和电能质量, 即形成了经典的优化理论——最优潮流(OPF)。OPF 已在电力市场很多经济理论中广泛应用^[4-10]。文中论证了等耗量微增率和等网损微增率同最优潮流的关系。

1 等耗量微增率

在传统的电力系统中, 有功功率负荷分布的最优准则是等耗量微增率准则, 当各发电机组的有功微增耗量相等时, 系统运行最经济^[1-3, 11-15]。其数学表达式为

$$\min F_{\Sigma} = F_1(P_{G1}) + F_2(P_{G2}) + \dots + F_n(P_{Gn}) = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi}) \quad (1)$$

满足等式约束:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} - \Delta P_{\Sigma} = 0 \quad (2)$$

当不计网损时, 式(2)写为

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} = 0 \quad (3)$$

满足不等式约束:

$$Q_{Gi, \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, \max} \quad (4)$$

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad (5)$$

$$P_{ij, \min} \leq P_{ij} \leq P_{ij, \max} \quad (6)$$

式中 $P_{Gi, \max}$ 、 $P_{Gi, \min}$ 为发电机有功功率上、下限; $Q_{Gi, \max}$ 、 $Q_{Gi, \min}$ 为发电机无功功率上、下限; $U_{i, \max}$ 、 $U_{i, \min}$ 为节点电压上、下限; $P_{ij, \max}$ 、 $P_{ij, \min}$ 为线路的传输功率极限; n 为节点数。

在不计网损的情况下, 构造拉格朗日函数

$$C = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi}) - \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} \right) \quad (7)$$

对式(7)求导, 得:

$$\frac{\partial F_1(P_{G1})}{\partial P_{G1}} = \frac{\partial F_2(P_{G2})}{\partial P_{G2}} = \dots = \frac{\partial F_n(P_{Gn})}{\partial P_{Gn}} = \lambda \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} = 0$$

式中 $F_i(P_{Gi})$ 为每台机组发出有功功率时需要的费用; λ 为耗量微增率。

式(8)的意义为系统所有的机组在同一耗量微增率情况下, 系统运行达到最优。

当计及系统网损时有

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1(P_{G1})}{\partial P_{G1}} \frac{1}{1 - \partial \Delta P_{\Sigma} / \partial P_{G1}} &= \frac{\partial F_2(P_{G2})}{\partial P_{G2}} \frac{1}{1 - \partial \Delta P_{\Sigma} / \partial P_{G2}} = \\ \dots &= \frac{\partial F_n(P_{Gn})}{\partial P_{Gn}} \frac{1}{1 - \partial \Delta P_{\Sigma} / \partial P_{Gn}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $1 / (1 - \partial \Delta P_{\Sigma} / \partial P_{Gn})$ 为网损修正因子。

由式(9)可见, 由于各节点网损修正因子的不同, 各节点的耗量微增率 $\partial F_i(P_{Gi}) / \partial P_{Gi}$ 不相等。

2 最优潮流

最优潮流是电力系统经济运行理论的一个重要分支, 指系统在当前接线和负荷水平时, 在满足一些

约束条件的情况下,通过调节控制变量使系统的运行状况达到最优。

经典的最优潮流数学模型可表示为

$$\min F(x) = \sum_{i=1}^{n_g} f_{Gi}(P_{Gi}) \quad (10)$$

式中 $f_{Gi}(P_{Gi})$ 为发电机发出有功功率时需要的成本费用; n_G 为发电机节点数。

满足等式约束(潮流约束):

$$g_{pi} = P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n U_i U_j |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0 \quad (11)$$

$$g_{qi} = Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j=1}^n U_i U_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0 \quad (12)$$

满足不等式约束:

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \quad (13)$$

$$Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \quad (14)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (15)$$

$$P_{Bi,\min} \leq P_{Bi} \leq P_{Bi,\max} \quad (16)$$

式中 θ_i 、 θ_j 为节点 i 、 j 的相角; Y_{ij} 为节点导纳矩阵元素; δ_{ij} 为导纳 Y_{ij} 的相角; $P_{Bi,\max}$ 、 $P_{Bi,\min}$ 为线路的传输功率极限; 其他同上。

将不等式约束转变成等式约束,形成扩展的拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} \min L = & \sum_{i=1}^{n_g} f_{pi}(P_{Gi}) - \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} g_{pi} - \sum_{i=1}^n \lambda_{qi} g_{qi} + \\ & \sum_{i=1}^{n_g} \pi_{1pi}(P_{Gi} - s_{1pi} - P_{Gi,\min}) + \sum_{i=1}^{n_g} \pi_{up_i}(P_{Gi} - s_{up_i} - P_{Gi,\max}) + \\ & \sum_{i=1}^{n_g} \pi_{1qi}(Q_{Gi} - s_{1qi} - Q_{Gi,\min}) + \sum_{i=1}^{n_g} \pi_{uqi}(Q_{Gi} - s_{uqi} - Q_{Gi,\max}) + \\ & \sum_{i=1}^{n_B} \pi_{1Bi}(P_{Bi} - s_{1Bi} - P_{Bi,\min}) + \sum_{i=1}^{n_B} \pi_{uBi}(P_{Bi} - s_{uBi} - P_{Bi,\max}) + \\ & \sum_{i=1}^{n_B} \pi_{1Ui}(U_i - s_{1Ui} - U_{i,\min}) + \sum_{i=1}^{n_B} \pi_{uUi}(U_i - s_{uUi} - U_{i,\max}) - \\ & \mu \left(\sum_{i=1}^k \ln s_{ui} + \sum_{i=1}^k \ln s_{1i} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

式中 s_1 、 s_u 为下限、上限松弛变量向量, $s_1 = [s_{1p}, s_{1q}, s_{1B}, s_{1U}]^T$, $s_u = [s_{up}, s_{uq}, s_{uB}, s_{uU}]^T$; π_1 、 π_u 为下限、上限对偶变量向量, $\pi_1 = [\pi_{1p}, \pi_{1q}, \pi_{1B}, \pi_{1U}]^T$, $\pi_u = [\pi_{up}, \pi_{uq}, \pi_{uB}, \pi_{uU}]^T$; μ 为对数障碍函数; n_B 为支路总数。

$$\rho_i^p = \frac{\partial L}{\partial P_i} \Big|_* = \lambda_{pi} \quad (18)$$

$$\rho_i^q = \frac{\partial L}{\partial Q_i} \Big|_* = \lambda_{qi} \quad (19)$$

式(18)的 ρ_i^p 表示的数学意义是发电费用函数对每个节点消耗有功功率的偏导数,表明每个节点增加单位有功功率需要消耗的成本费用, ρ_i^p 也就是电力市场中的实时电价^[3]。两节点的实时电价差别则主要是由网损造成的,当不计及网损时,两节点的实时电价相等^[4-5]。此外,同时由式(18)的推导也可见:当忽略线路电阻时,即不考虑系统有功功率损耗时,由最优潮流求得的 λ_{pi} 相等。这和没有考虑有功

网损的等网损微增率因子 λ 具有相同意义(各点的耗量相等时,发电机成本费用最小)。当考虑有功网损时,即增加了网损修正因子 $1/(1 - \partial \Delta P_\Sigma / \partial P_{Gi})$,各节点实时电价不同,即求解最优潮流时,各节点不同 λ_{pi} 的原因。由上述分析可见,最优潮流实质上是等耗量微增率的进一步发展。

式(19)的物理意义是系统费用函数对每个节点消耗无功功率的偏导数,表明每个节点增加单位无功功率需要消耗的费用。

3 算例证明

现以 IEEE 9 节点系统为例进行分析。系统接线如图 1 所示。

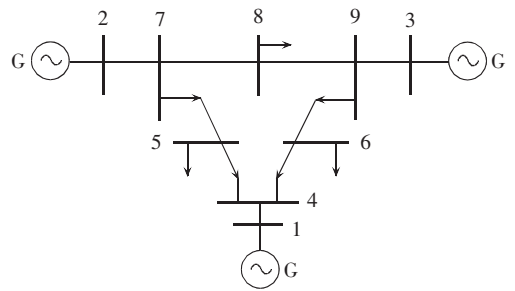


图 1 IEEE 9 节点系统

Fig.1 IEEE nine-bus system

当系统的各条线路电阻均为 0 时,系统的有功网损为 0,这相当于忽略了系统的有功网损。这时,根据最优潮流计算所得结果如表 1 所示。

表 1 最优潮流计算所得计算结果

Tab.1 Calculated results of optimal power flow theory

节点号	$U/\text{p.u.}$	P_{Gi}/MW	Q_{Gi}/Mvar	P_{Li}/MW	Q_{Li}/Mvar	λ_{pi}
1	1.093	86.56	-8.38	0	0	24.044
2	1.004	134.38	61.59	0	0	24.044
3	0.940	91.06	-3.40	0	0	24.044
4	0.910	0	0	0	0	24.044
5	0.914	0	0	125	50	24.044
6	0.944	0	0	90	30	24.044
7	0.949	0	0	0	0	24.044
8	0.969	0	0	100	35	24.044
9	0.968	0	0	0	0	24.044

由表 1 可见,在不计及有功网损的情况下,求解最优潮流所得的拉格朗日乘子均相同。即表明,当满足方程的拉格朗日乘子相同的情况下,系统运行状态最优。这和满足等耗量微增率的意义相同,即所有节点的耗量微增率相等时,系统达到最优。因此,这进一步论证了最优潮流和等耗量微增率之间的联系,即最优潮流包含了等耗量微增率,是等耗量微增率的进一步发展。

4 等网损微增率准则

经典的无功功率电源最优分布是按等网损微增率准则分布,其物理意义是当全网无功电源节点服从等网损微增率时,系统有功网损费用最小^[1-3,11-15],

其目标是研究无功功率电源对系统有功网损的影响,可表示为

$$\min F(\Delta P_{\text{loss}}) \quad (20)$$

式中 $F(\Delta P_{\text{loss}})$ 为有功网损的费用函数。

满足等式约束:

$$\sum_{i=1}^n Q_{Gi} - \sum_{i=1}^n Q_{Li} - \Delta Q_{\Sigma} = 0 \quad (21)$$

满足不等式约束:

$$\begin{aligned} Q_{Gi,\min} &\leq Q_i \leq Q_{Gi,\max} \\ U_{i,\min} &\leq U_i \leq U_{i,\max} \end{aligned} \quad (22)$$

根据目标函数和等式约束条件构造拉格朗日函数:

$$C = F(\Delta P_{\text{loss}}) + \lambda^* \left(\sum_{i=1}^n Q_{Gi} - \sum_{i=1}^n Q_{Li} - \Delta Q_{\Sigma} \right) = 0 \quad (23)$$

对其求极值,可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\Delta P_{\text{loss}})}{\partial Q_{G1}} \frac{1}{1 - \partial \Delta Q_{\Sigma} / \partial Q_{G1}} &= \\ \frac{\partial F(\Delta P_{\text{loss}})}{\partial Q_{G2}} \frac{1}{1 - \partial \Delta Q_{\Sigma} / \partial Q_{G2}} &= \dots = \\ \frac{\partial F(\Delta P_{\text{loss}})}{\partial Q_{Gn}} \frac{1}{1 - \partial \Delta Q_{\Sigma} / \partial Q_{Gn}} &= \dots = \end{aligned} \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{Gi} - \sum_{i=1}^n Q_{Li} - \Delta Q_{\Sigma} = 0$$

由式(24)可见,当各无功电源具有统一的等网损微增率时,系统的有功网损最小。这和式(19)的意义相同,即当满足等网损微增率时,系统的运行状态达到最优,此时网损最小。由上述分析可见,最优潮流也包含了等网损微增率。

5 结语

分析了经典的有功功率负荷分布的最优准则——等耗量微增率准则和无功电源的最优分布准则——等网损微增率准则的意义,论述了两者的最优潮流的关系。指出最优潮流包含了这 2 个经典的最优准则,是这 2 个准则的进一步灵活运用。

参考文献:

- [1] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [2] 诸骏伟. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [3] 王锡凡,王秀丽,陈皓勇. 电力市场基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,2003.
- [4] 杜松怀. 电力市场[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [5] 赵风云,王秀丽. 输配电市场[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [6] 于尔铿,韩放,谢开,等. 电力市场[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [7] 尚金成,黄永皓,夏清,等. 电力市场理论与研究[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [8] SCHWEPPE F C, CARAMANIS M C, TABORS R D, et al. Spot pricing of electricity[M]. Boston, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [9] EL-KEIB A A, MA X. Calculating short-run marginal costs of active and reactive power production[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 559-565.
- [10] AUGHMANN M L, SIDDIQI S N, ZARNIKAU J W. Advanced pricing in electrical system. Part II: implications[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 496-502.
- [11] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [12] 国家电力调度通信中心. 电网调度运行实用技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [13] 于尔铿,刘广一,周京阳,等. 能量管理系统[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [14] 周全仁,张清益. 电网分析与发电计划[M]. 长沙:湖南科学出版社,1996.
- [15] 李坚. 电网运行及调度技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:



王正风

王正风(1976-),男,安徽巢湖人,博士,研究方向为电力系统稳定与电力市场(E-mail: wzhengf@163.com);

汤伟(1978-),男,安徽含山人,硕士,从事电网运行分析工作;

吴昊(1980-),女,安徽淮南人,硕士,主要研究方向为电力系统稳定和控制;

谢大为(1978-),男,安徽滁州人,硕士,从事电力系统调度运行工作。

Discussion of relations between equal consumed energy increase ratio law & equal network loss increase ratio law and optimal power flow

WANG Zheng-feng, TANG Wei, WU Hao, XIE Da-wei

(Anhui Electrical Power Dispatching & Communication Center, Hefei 230022, China)

Abstract: The equal consumed energy increase ratio law and the equal network loss increase ratio law are classical economical operational laws of power systems. The former is the optimal rule for active load distribution, while the latter for reactive source distribution. The optimal power flow is an economical operation theory. Through objective function comparison, constraint comparison, physical meaning analysis and simulation, the relation between equal consumed energy ratio and optimal power flow and the relation between equal network loss ratio and optimal power flow are analyzed. Results show that, the two laws are embodied in the optimal power flow theory and the optimal power flow is the flexible use of these two laws.

Key words: equal consumed energy increase ratio; equal network loss increase ratio; optimal power flow; spot price