

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.03.024

基于网络分析的发电机无功优化研究^{*}

王 竞¹, 赵静波², 吴 浩^{1*}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 江苏省电力公司 电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:为解决发电机无功优化的问题,提出了一种具有概念清晰、计算便捷等特点的基于网络分析的发电机无功优化方法。该方法的实现过程包括,首先利用节点功率平衡的关系以及支路电压损耗的关系,得到了各节点电压以及支路无功潮流对除平衡节点以外的发电机节点无功出力以及平衡节点电压的近似灵敏度;其次,根据基于无功潮流追踪的网损分摊方法,将有功网损分摊到各发电机节点,且按照网损分摊的大小选取了发电机无功优化点;然后,通过各支路潮流以及节点电压,建立了近似的网损优化模型,且计算得到了发电机无功优化点的优化量;最后,用 IEEE39 节点系统验证了所提方法的有效性以及可行性。研究结果表明,所采取的措施能同时改善无功功率分布以及电压水平,具有一定的实用价值。

关键词:无功优化;潮流追踪;支路无功潮流;发电机无功出力;灵敏度

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)03-0377-06

Generation reactive power optimization based on network analysis

WANG Jing¹, ZHAO Jing-bo², WU Hao¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jiangsu Electric Power Corporation Electrical Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to solve the problem of generation reactive power optimization, a method which has the character of clear concept and brief computation for generation reactive power optimization based on network analysis was proposed. Using the relationship of balance of node power and branch voltage loss, node voltage and branch reactive power flow approximate sensitivity to generation reactive power except slack node and voltage of slack node was established. Through the loss allocation method based on power tracing, power loss to generation node was allocated and generation reactive power optimization nodes was selected. By means of building approximate loss optimization model via branch reactive power and node voltage, the amount of reactive power optimization was computed. The result of IEEE39-bus system verifies the validity of the method. The results indicate that, the distribution of reactive power and voltage level is improved by the optimization method, so it has practical value.

Key words: reactive power optimization; power tracing; branch reactive power flow; generation reactive power; sensitivity

0 引 言

电网中无功功率有着很重要的作用,不仅关系到电力系统向电力用户提供电能质量的优劣,还直接影响电网自身运行的安全性。从改善电压质量和降低网络功率损耗的角度考虑,应该尽量减少无功功率流动,

特别是避免在电网内的长距离传输。电力系统无功优化是能够改善电压质量和降低网损的有效措施,并且随着现代电力系统规模日益扩大,无功优化的重要性引起越来越多的关注^[1]。

电力系统最优潮流在 20 世纪 60 年代提出,并在无功优化等领域逐步得到推广与应用^[2]。至今已提出的

收稿日期:2013-11-26

基金项目:浙江省科技厅重点创新团队建设资助项目(2010R50004)

作者简介:王 竞(1989-),女,山西平遥人,主要从事电力系统无功优化方面的研究. E-mail:wjhz0621@126.com

通信联系人:吴 浩,男,副教授,硕士生导师. E-mail:vuhao@zju.edu.cn

求解最优潮流的方法有很多,主要包括:线性规划法、非线性规划法、内点法、混合整数规划法、人工智能方法等,这些方法各具特点,但求解过程均相对复杂^[3-12]。

基于无功潮流追踪的发电机网损分摊方法是指利用潮流追踪的方法确定无功传输的路径,定义衡量发电机节点无功功率对系统网损影响的指标,即为各发电机节点的网损分摊量^[13-14]。

本研究提出一种基于网络分析的发电机无功优化方法。该方法从简单的公式出发,运用基本的功率以及电压关系,推导得到节点电压以及支路无功潮流变化与发电机无功出力以及平衡节点电压变化的关系,进而得出有功网损变化与发电机无功出力以及平衡节点电压变化的关系;通过调节发电机无功出力,达到改善电压以及无功功率分布等无功优化的目的,充分体现该方法计算简单、速度较快的特点^[15]。

1 基于支路分析的网损计算

1.1 支路等值模型

为了便于分析支路无功潮流,本研究将系统进行下述等效:在各支路中间增加虚拟节点,而线路充电功率按照 π 型等值电路,在线路两端等效为无功源,这样就将如图 1 所示的基本 π 型等值模型,变为如图 2 所示的支路等值模型。

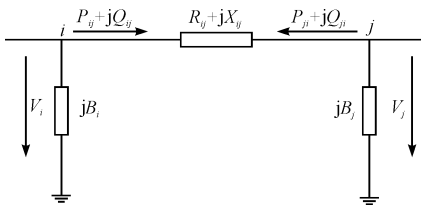


图 1 基本 π 型等值模型

V_i, V_j —节点 i 和 j 的电压幅值; B_i, B_j —节点 i 和 j 的接地导纳以及并联电容之和; $R_{ij} + jX_{ij}, R_{ik} + jX_{ik}, R_{jk} + jX_{jk}$ —支路 (i, j) , 支路 (i, k) 和支路 (j, k) 的阻抗; $B_i V_i^2, B_j V_j^2$ —注入节点 i 和 j 的充电功率; $P_{ij} + jQ_{ij}$ —节点 i 流至节点 j 的有功以及无功功率, $P_{ik} + jQ_{ik}$ —节点 i 流至节点 k 的有功以及无功功率, 且 $P_{ik} + jQ_{ik} = P_{ij} + jQ_{ij}$; 同理, $P_{jk} + jQ_{jk} = P_{ji} + jQ_{ji}$; n —系统节点数; n_b —系统支路数; 下标 $i, j = 1, 2, \dots, n$ —系统节点序号; $k = n + 1, n + 2, \dots, n + n_b$ 。

根据上述等效,可通过如下方法确定图 1 中与图 2 中的支路阻抗的关系。由图 1 可知,支路 (i, j) 的无功损耗 $Q_{\text{loss}(ij)}$ 为:

$$Q_{\text{loss}(ij)} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} X_{ij} = \frac{P_{ji}^2 + Q_{ji}^2}{V_j^2} X_{ij} = Q_{\text{loss}(ij)}^P + Q_{\text{loss}(ij)}^Q \quad (1)$$

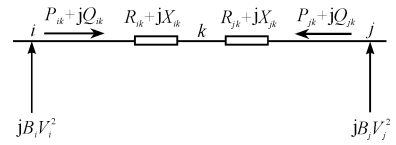


图 2 支路等值模型

V_i, V_j —节点 i 和 j 的电压幅值; B_i, B_j —节点 i 和 j 的接地导纳以及并联电容之和; $R_{ij} + jX_{ij}, R_{ik} + jX_{ik}, R_{jk} + jX_{jk}$ —支路 (i, j) , 支路 (i, k) 和支路 (j, k) 的阻抗; $B_i V_i^2, B_j V_j^2$ —注入节点 i 和 j 的充电功率; $P_{ij} + jQ_{ij}$ —节点 i 流至节点 j 的有功以及无功功率, $P_{ik} + jQ_{ik}$ —节点 i 流至节点 k 的有功以及无功功率, 且 $P_{ik} + jQ_{ik} = P_{ij} + jQ_{ij}$; 同理, $P_{jk} + jQ_{jk} = P_{ji} + jQ_{ji}$; n —系统节点数, n_b —系统支路数, 下标 $i, j = 1, 2, \dots, n$ —系统节点序号; $k = n + 1, n + 2, \dots, n + n_b$ 。

式中: $Q_{\text{loss}(ij)}^P$ —由有功流动引起的无功损耗, $Q_{\text{loss}(ij)}^Q$ —由无功流动引起的无功损耗。根据对称性, 取 $Q_{\text{loss}(ij)}^P = (P_{ij}^2 X_{ij} / V_i^2 + P_{ji}^2 X_{ij} / V_j^2) / 2$, 则可得:

$$Q_{\text{loss}(ij)}^Q = \frac{1}{2} \left(\frac{P_{ij}^2 X_{ij}}{V_i^2} + \frac{P_{ji}^2 X_{ij}}{V_j^2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{ij}^2 X_{ij}}{V_i^2} + \frac{Q_{ji}^2 X_{ij}}{V_j^2} \right) \quad (2)$$

而由图 2 知,支路 (i, k) 的无功损耗 $Q_{\text{loss}(ik)}$ 与支路 (j, k) 无功损耗 $Q_{\text{loss}(jk)}$ 之和,即为图 1 中支路 (i, j) 的无功损耗:

$$Q_{\text{loss}(ik)} + Q_{\text{loss}(jk)} = \frac{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}{V_i^2} X_{ik} + \frac{P_{jk}^2 + Q_{jk}^2}{V_j^2} X_{jk} \quad (3)$$

将式(2)与式(3)比较,可得 $X_{ik} = X_{jk} = X_{ij} / 2$; 同理, $R_{ik} = R_{jk} = R_{ij} / 2$ 。

1.2 节点无功功率以及支路电压分析

假设由系统节点流至虚拟节点的无功流动方向为正,系统节点集合为 N_i ,虚拟节点集合为 N_e ,则对于系统节点 $i (i \in N_i)$,有下列无功功率平衡方程:

$$Q_{Gi} + B_i V_i^2 = Q_{Li} + \sum_{m \in N_e} Q_{im} \quad (4)$$

式中: Q_{Gi} —节点 i 的无功出力, Q_{Li} —节点 i 的无功负荷, Q_{im} —节点 i 流至节点 m 的无功功率。

对于虚拟节点 $k (k \in N_e)$,无功功率平衡方程为:

$$Q_{ik} - Q_{\text{loss}(ik)} + Q_{jk} - Q_{\text{loss}(jk)} = 0 \quad (5)$$

由图 2 知,支路 (i, k) 的电压损耗可由支路潮流表示:

$$V_i - V_k = \sqrt{\left(V_k + \frac{P_{ik} R_{ik} + Q_{ik} X_{ik}}{V_i} \right)^2 + \left(\frac{P_{ik} X_{ik} - Q_{ik} R_{ik}}{V_i} \right)^2} - V_k \approx \frac{P_{ik} R_{ik} + Q_{ik} X_{ik}}{V_i} \quad (6)$$

1.3 系统有功网损

由图 2 得,支路 (i, k) 的有功功率损耗为:

$$P_{\text{loss}(ik)} = I^2 R_{ik} = \frac{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}{V_i^2} R_{ik} \quad (7)$$

则系统有功网损(即所有支路有功损耗)为:

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i \in N_l \cap k \in N_e} P_{\text{loss}(ik)} \quad (8)$$

2 基于网损分析的发电机无功优化

2.1 发电机无功优化点的选择

根据基于潮流追踪的网损分摊方法,本研究将系统有功网损分摊到各发电机节点。这一分摊,体现了各发电机无功出力对系统网损影响的大小。通过对发电机无功出力进行优化,减少网损分摊大的发电机节点无功出力,同时增加网损分摊小的发电机节点无功出力,可以改善无功潮流分布,同时减少有功网损。

无功优化点的确定方法为:按照各发电网损分摊的大小排序,根据所需的无功优化点数 p ,选择前 q 个节点,减少其无功出力,并针对最后 $p - q$ 个节点,增加其无功出力。

2.2 节点电压、支路无功潮流对发电机无功出力和平衡节点电压的近似灵敏度

为了获得节点电压和支路无功潮流对发电机无功出力和平衡节点电压的近似灵敏度,本研究将功率平衡方程以及电压损耗等式均根据一阶泰勒展开式展开,并进行以下假设:①除平衡节点以外的发电机节点有功出力均不变;②发电机节点 i 的无功出力变化 ΔQ_{Gi} ,除平衡节点以外其他发电机节点的无功出力均不变;③系统节点的有功以及无功负荷均不发生变化。

由于在电力系统中,有功潮流和无功潮流可近似解耦,可忽略无功变化对有功潮流的影响。根据上述假设,由式(4)知,当发电机节点 i 的无功出力变化 ΔQ_{Gi} 时,节点 i 的无功功率平衡方程变化为:

$$\Delta Q_{Gi} + 2B_i V_i \Delta V_i = \sum_{m \in N_e} \Delta Q_{im} \quad (9)$$

而针对虚拟节点 k ,由式(3,5)可得,无功功率平衡方程的变化为:

$$\Delta Q_{ik} - \left(\frac{2Q_{ik}X_{ik}}{V_i^2} \Delta Q_{ik} - \frac{2(P_{ik}^2 + Q_{ik}^2)X_{ik}}{V_i^3} \Delta V_i \right) + \Delta Q_{jk} - \left(\frac{2Q_{jk}X_{jk}}{V_j^2} \Delta Q_{jk} - \frac{2(P_{jk}^2 + Q_{jk}^2)X_{jk}}{V_j^3} \Delta V_j \right) = 0 \quad (10)$$

对于支路 (i, k) ,根据式(6)推得电压损耗的变化为:

$$\Delta V_i - \Delta V_k = \frac{X_{ik}}{V_i} \Delta Q_{ik} - \frac{P_{ik}R_{ik} + Q_{ik}X_{ik}}{V_i^2} \Delta V_i \quad (11)$$

将式(9,10,11)整理,可推得系统任一节点 $l(l \in$

$N_l)$ 电压 V_l 对发电机节点 i 无功出力 Q_{Gi} 以及平衡节点电压 V_{GS} 的近似灵敏度:

$$\Delta V_l = \beta_l \Delta V_{GS} + \alpha_i \Delta Q_{Gi} \quad (12)$$

进一步推得任一支路 (l, m) ($m \in N_e$) 的无功潮流 Q_{lm} 对发电机节点 i 无功出力和平衡节点电压的近似灵敏度:

$$\Delta Q_{lm} = \eta_k \Delta V_{GS} + \gamma_i \Delta Q_{Gi} \quad (13)$$

2.3 无功优化的数学模型

根据2.2节所得结果,可以得到各节点电压以及支路无功潮流对除平衡节点以外的发电机节点无功出力以及平衡节点电压的近似灵敏度:

$$\Delta V_l = \beta_l \Delta V_{GS} + \sum_{i \in SG} \alpha_i \Delta Q_{Gi} \quad (14)$$

$$\Delta Q_{lm} = \eta_k \Delta V_{GS} + \sum_{i \in SG} \gamma_i \Delta Q_{Gi} \quad (15)$$

式中:SG—除平衡节点以外的发电机节点的集合。

当发电机无功出力变化时,根据二阶泰勒展开式,支路 (l, m) 的有功损耗变化为:

$$\Delta P_{\text{loss}(lm)} = \frac{R_{lm}}{V_l^2} \Delta Q_{lm}^2 + \frac{2Q_{lm}R_{lm}}{V_l^2} \Delta Q_{lm} - \frac{4Q_{lm}R_{lm}}{V_l^3} \Delta Q_{lm} \Delta V_l + \frac{3(P_{lm}^2 + Q_{lm}^2)R_{lm}}{V_l^4} \Delta V_l^2 - \frac{2(P_{lm}^2 + Q_{lm}^2)R_{lm}}{V_l^3} \Delta V_l \quad (16)$$

将式(14,15)代入式(16),可以得到支路网损与发电机无功出力以及平衡节点电压的关系式:

$$\Delta P_{\text{loss}(lm)} = \sum_{i,j \in SG \cap i \neq j} (a_i \Delta Q_{Gi}^2 + b_{ij} \Delta Q_{Gi} \Delta Q_{Gj} + a_j \Delta Q_{Gj}^2) + \sum_{i \in SG} c_i \Delta Q_{Gi} + d_l \Delta V_{GS}^2 + \Delta V_{GS} \sum_{i \in SG} e_{li} \Delta Q_{Gi} + f_l \Delta V_{GS} \quad (17)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{R_{lm}}{V_l^2} \gamma_i^2 + \frac{3(P_{lm}^2 + Q_{lm}^2)R_{lm}}{V_l^4} \alpha_i^2 - \frac{4Q_{lm}R_{lm}}{V_l^3} \alpha_i \gamma_i, \\ b_{ij} &= \frac{2R_{lm}}{V_l^2} \gamma_i \gamma_j + \frac{6(P_{lm}^2 + Q_{lm}^2)R_{lm}}{V_l^4} \alpha_i \alpha_j - \frac{4Q_{lm}R_{lm}}{V_l^3} (\alpha_i \gamma_j + \gamma_i \alpha_j), \\ c_i &= \frac{2Q_{lm}R_{lm}}{V_l^2} \gamma_i - \frac{2(P_{lm}^2 + Q_{lm}^2)R_{lm}}{V_l^3} \alpha_i, \\ d_l &= \frac{R_{lm}}{V_l^2} \eta_k^2 + \frac{3(P_{lm}^2 + Q_{lm}^2)R_{lm}}{V_l^4} \beta_l^2 - \frac{4Q_{lm}R_{lm}}{V_l^3} \eta_k \beta_l, \\ e_{li} &= \frac{2R_{lm}}{V_l^2} \eta_k \gamma_i + \frac{6(P_{lm}^2 + Q_{lm}^2)R_{lm}}{V_l^4} \beta_l \alpha_i - \frac{4Q_{lm}R_{lm}}{V_l^3} (\eta_k \alpha_i + \beta_l \gamma_i), \\ f_l &= \frac{2Q_{lm}R_{lm}}{V_l^2} \eta_k - \frac{2(P_{lm}^2 + Q_{lm}^2)R_{lm}}{V_l^3} \beta_l. \end{aligned}$$

则系统有功网损的变化为:

$$\Delta P_{\text{Loss}} = \sum_{l \in N_l \cap m \in N_e} \Delta P_{\text{loss}(lm)} \quad (18)$$

根据上述所得系统网损的变化,给定各发电机无功优化可调配的总无功调配量 Q_{sum} 以及平衡节点电压

优化量 V_{chg} , 确定其各自优化量的问题可近似描述为如下优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & \Delta P_{\text{Loss}} \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i \in SO} d_i \Delta Q_{Gi} = Q_{\text{sum}} \\ \Delta V_{\text{GS}} = V_{\text{chg}} \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

式中: ΔQ_{Gi} —发电机节点 i 的无功优化量, SO — p 个无功优化点的集合, 且:

$$d_i = \begin{cases} -1 & \text{前 } q \text{ 个网损分摊大的节点} \\ 1 & \text{最后 } p-q \text{ 个网损分摊小的节点} \end{cases}$$

引入拉格朗日乘子 λ , 可得上述模型的最优条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta P_{\text{Loss}}}{\partial \Delta Q_{Gi}} = \lambda \\ \sum_{i \in SO} d_i \Delta Q_{Gi} = Q_{\text{sum}} \\ \Delta V_{\text{GS}} = V_{\text{chg}} \end{cases} \quad (20)$$

而在实际电力系统中, 各节点电压均存在上、下限。根据基态节点电压幅值, 可以求得各节点电压变化, 即 ΔV_i 的上、下限; 根据节点电压变化与发电机无功出力变化的关系式式 (14), 可求得发电机节点 i 的无功出力变化 ΔQ_{Gi} 的上、下限; 同理可得到所有发电机无功出力变化 ΔQ_G 的上、下限。当优化量 ΔQ_{Gi} 越过其上限或者下限时, 令 ΔQ_{Gi} 等于其上限或者下限, 然后将该值从总无功调配量中减去, 并除去该优化点, 对剩余的无功优化点重新进行优化, 计算其无功优化量。

3 算例分析

以如图 3 所示的 IEEE 39 节点系统为例, 验证本研究方法的有效性。该系统基态网损为 0.432 4, 总无功出力为 16.783 2, 节点 30~39 为发电机节点, 其中节点 39 为平衡节点。设可控制总发电机无功优化量为 1.0, 可控发电机节点为 3 个。

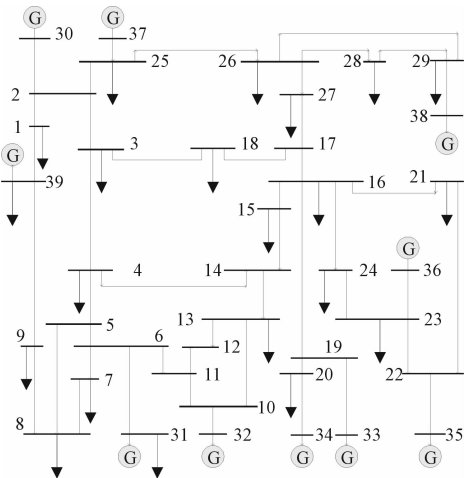


图 3 IEEE39 系统节点图

3.1 发电机无功优化点的选择

如图 3 所示, 本研究以离平衡节点距离最近、中间距离以及最远的 3 个发电机节点 30、32 和 38 为例, 验证节点电压对发电机无功出力的近似灵敏度。基态情况下, 发电机 30 无功出力为 1.46。比较这 3 个节点在发电机节点 30 基态无功出力的 $(-20\%, 40\%)$ 调节范围内, 由式 (14) 所得电压变化和实际调节后所得的电压变化如图 4 所示, 其中未对平衡节点进行优化的结果如图 4(a) 所示, 对平衡节点进行优化的结果如图 4(b) 所示, ΔV_{GS} 为 0.01。经过计算, 可知计算而得的电压变化与实际电压变化的误差在 5% 之内, 表明式 (14) 有较高的精度。

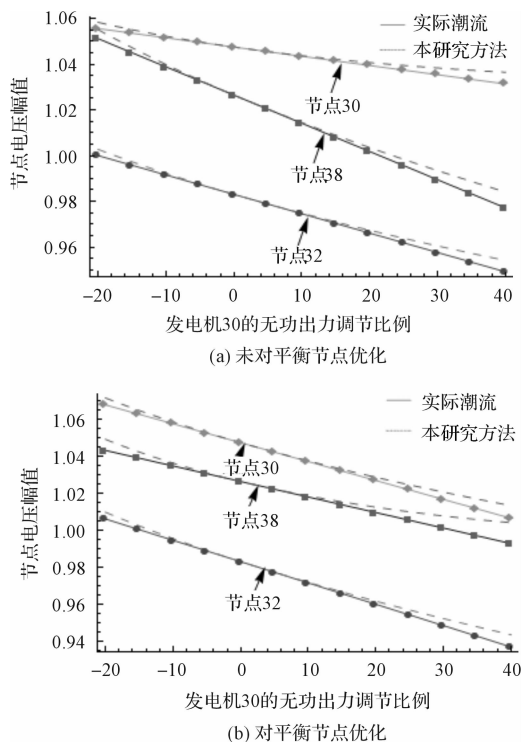


图 4 节点 30、32 和 38 电压水平比较

本研究选择离平衡节点距离最近、中间距离以及最远的 4 个发电机节点 30、32、33 和 38, 验证有功网损变化对发电机无功出力变化以及平衡节点电压的近似灵敏度。笔者将这 4 个发电机节点无功出力在基态无功出力下调节 $(-20\%, 40\%)$, 且将实际调节后所得系统有功网损的变化结果与由式 (18) 所得结果比较, 比较情况如图 5 所示。由图 5 可见, 式 (18) 有较高的精度。

3.2 计算结果分析

根据 2.1 节的基于潮流追踪的网损分摊方法得到的各发电机节点的有功网损分摊量如图 6 所示, 可选节点 38、33 以及 32 为无功优化点, 这 3 个节点的基态无功出力分别为 1.132, 1.514, 1.092。

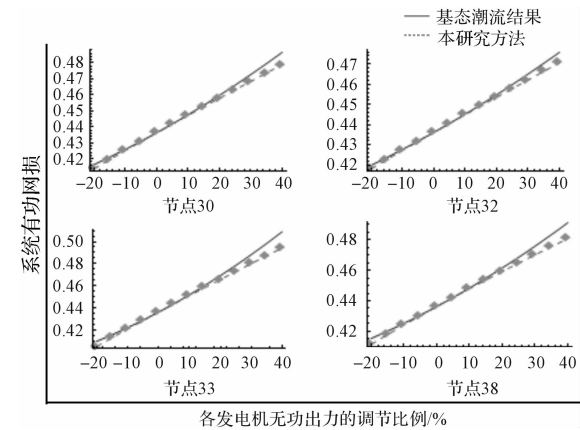


图5 30、32、33 和 38 节点的无功出力变化引起的有功网损比较

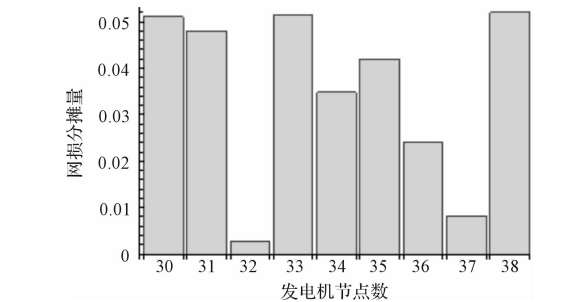


图6 发电机节点网损分摊量的大小

根据 2.3 节方法,计算得到的这 3 个发电机节点无功优化量结果如表 1 所示。

表 1 无功优化量的计算结果				
节点	优化前有功网损分摊	优化后有功网损分摊	优化量	优化百分数
38	0.051 99	0.023 35	-0.433 0	39.65%
33	0.051 34	0.040 47	-0.372 3	24.81%
32	0.002 73	0.006 47	0.194 7	16.91%

由表 1 可以看出,节点 38 和 33 的有功网损分摊减少,而节点 32 的有功网损分摊增大,并且经过统计,可发现,除节点 32 以外的各发电机节点的有功网损分摊均减少,说明本研究通过优化,有效地降低了节点的有功网损分摊,从而减少了有功网损。

在基态潮流情况下,支路(38,85),(29,85)等支路有功网损较大,有功网损较大的 10 条支路如图 7 所示。经过优化,90.2% 支路的有功损耗都减少。支路网损减少最如表 2 所示,表 2 中数据表示上述 10 条有功网损最大支路的,经过优化,其支路有功损耗都减少,表明经过优化,减少了部分支路的无功传输,而使系统无功分布更为合理。

表 2 支路网损减少量					
支路编号	(38,85)	(29,85)	(25,43)	(2,43)	(19,61)
网损减少	-12.35	-12.35	-16.15	-16.15	-14.16
百分数/(%)	-12.35	-12.35	-16.15	-16.15	-14.16
支路编号	(16,61)	(33,80)	(22,66)	(21,66)	(24,68)
网损减少	-14.16	-13.23	-12.61	-12.61	-13.19
百分数/(%)	-14.16	-13.23	-12.61	-12.61	-13.19

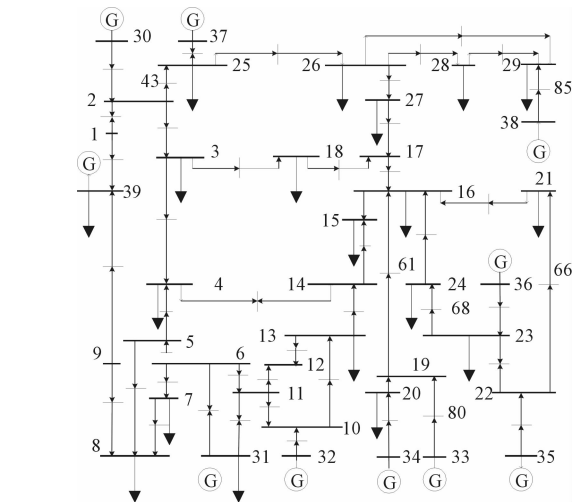


图7 增加虚拟节点后的 39 节点无功潮流分布图

3.3 与其他优化方法比较

基于 OPF 的网损优化方法具有严格的理论基础,考虑节点电压上、下限等约束,建模非常灵活,然而 OPF 模型的求解较复杂;与它相比,本研究的方法较简单,能在改善系统无功分布的同时,降低系统的网损。

为验证本研究算法的有效性,笔者分别采用本研究方法与基于 OPF 的无功优化方法的计算结果,并对结果进行分析,其对比结果如表 3 所示,其中方法 1 为未对平衡节点进行优化的本研究方法,方法 2 为对平衡节点进行优化的本研究方法,平衡节点电压优化量为 0.01,方法 3 为基于 OPF 的方法。

两种优化算法的结果比较如表 3 所示,在同样的优化总量下,方法 1、2、3 分别降低网损 11.7%,12.0%,12.1%,降损效果相差不大;从选点结果来看,本研究所提方法选择节点 38、33 与 32,OPF 方法选择节点 33、30 与 32,而由图 6 可知,节点 38、33 以及 30 均为有功网损分摊量较大的节点,节点 32 为有功网损分摊最小的节点;从优化结果看,本研究方法中,主要优化在节点 38 和 33 且对平衡节点进行优化以后降损效果更为显著,而基于 OPF 方法的无功优化方法,所得到各节点的无功优化量相对比较平均。

表 3 两种优化算法的结果比较					
方法	优化后网损	无功优化情况			
方法 1	0.381 4	优化点	38	33	32
		优化量	-0.433 0	-0.372 3	0.194 7
方法 2	0.380 6	优化点	38	33	32
		优化量	-0.463 2	-0.383 4	0.153 4
方法 3	0.380 2	优化点	33	30	32
		优化量	-0.347 4	-0.331 4	0.321 2

两种优化方法优化后电压水平比较如图 8 所示。

由图 8 可见,两种方法都对电压有改善作用,但是本研究所提方法有更好的效果。这是由于本研究方法通过改善无功功率的分布情况,达到改善电压的效果。

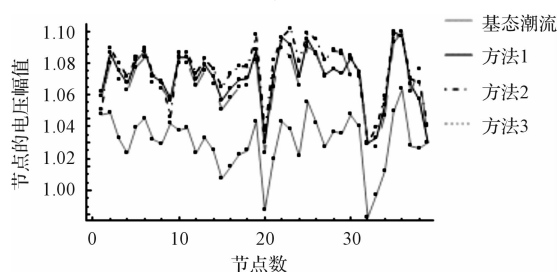


图 8 两种方法优化后电压水平比较

4 结束语

本研究通过较为简单的方法,对无功优化这一相对复杂问题进行了处理与分析;利用基本的电路关系,建立了近似的二次网损模型,并且达到了改善无功功率分布以及电压的效果,与以往的优化方法相比,有一定的实用价值。IEEE39 节点系统计算结果表明该方法具有可行性,并从各方面说明其特点。

本研究方法只考虑发电机无功出力变化时对支路无功潮流以及节点电压的影响,而忽略对支路有功潮流的影响,需在今后加以改进。

参考文献 (References):

- [1] 程浩忠,吴 浩. 电力系统无功与电压稳定性[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 刘明波,谢 敏,赵维兴. 大电网最优潮流计算[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] IBA K, SUZUKI H. Practical reactive power allocation /operation planning using successive linear programming[J].

IEEE Transactions on Apparatus and Systems, 1988, 3 (2):558-566.

- [4] 姚诸香,涂惠亚,徐国禹. 基于灵敏度分析的无功优化[J]. 电力系统自动化,1997,21(11):19-21.
- [5] NEMA S, GOULERMAS J, SPARROW, et al. A hybrid particle swarm branch-and-bound optimizer for mixed discrete nonlinear programming[J]. IEEE Transaction on Systems, 2008, 38(6):1411-1424.
- [6] 张永平,童小娇,吴复立,等. 基于非线性互补问题函数的半光滑牛顿最优潮流算法[J]. 中国电机工程学报,2004, 24(9):130-135.
- [7] WU Yu-Chi, DEBS A S, MARSTEN R E. A direct predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2):876-883.
- [8] 李乃湖. 计及整形控制变量的电压-无功功率优化[J]. 电力系统自动化,1994,18(12):5-11.
- [9] UYER S, RAMACHANDRAN K, HARIHARAN S. Optimal reactive power allocation for improved system performance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus, 1984, 103 (6):1509-1515.
- [10] 张粒子,舒 隽,林宪枢,等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报,2000,20(6):5-8.
- [11] 刘自发,葛少云,余贻鑫. 基于混沌粒子群优化方法的电力系统无功最优潮流[J]. 电力系统自动化,2005, 29 (7):53-57.
- [12] 刘 方,颜 伟. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略[J]. 中国电机工程学报,2005, 25(15):67-72.
- [13] 杨克难,吴 浩,郑宁浪. 一种基于潮流追踪的电力系统无功补偿方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):45-51.
- [14] 汤 毅. 面向对象的配电网无功补偿配置优化算法研究[J]. 机电工程技术,2012,41(10):55-58,122.
- [15] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社, 2003.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

王 竞,赵静波,吴 浩. 基于网络分析的发电机无功优化研究[J]. 机电工程,2014,31(3):377-382.

WANG Jing, ZHAO Jing-bo, WU Hao. Generation reactive power optimization based on network analysis[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(3):377-382.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>