牛顿法最优潮流的改进

王永刚,彭世康,靳现林

(北京许继电气有限公司,北京　100085)

摘要: 对牛顿法最优潮流提出了改进措施,将发电节点有功功率、无功功率以及补偿节点无功功率作为状态量处理,通过拉格朗日乘子求取 P_{gi} 和 Q_{gi},简化了不等式约束的处理,改进后的方法不再需要罚函数法。改进后的算法程序实现简捷,计算速度快,收敛性能好,计算结果准确可靠。

关键词: 牛顿法;　最优潮流;　算法

中图分类号: TM71　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1003-4987(2003)03-0001-05

1　引言

最优潮流问题[1](Optimal Power Flow,简称OPF),研究各种控制设备的最优调整方式,使得某种运行性能指标(目标函数)在满足各种安全约束条件下达到最优。目标函数可取为使系统发电运行费用最小

$$F = \min f = \sum_{i\in NP} f_i(P_{gi}) \tag{1}$$

式(1)中,f_i 是发电机运行费用曲线;NP 为有功可调的发电机节点的集合。f_i 一般表示为

$$f_i = A_i + B_i P_{gi} + C_i P_{gi}^2 + D_i P_{gi}^3 + \cdots \tag{2}$$

D. I. Sun 提出的牛顿法[2]是求解最优潮流问题的有效方法之一。围绕着这一方法,研究人员做了许多改进[3~6]。

本文以 D. I. Sun、王宪荣、严正等研究人员对牛顿法最优潮流的研究成果为基础,进行深层次地拓展和简化处理,提出了牛顿法最优潮流的改进措施。改进主要有以下几点:

①目标函数由纯有功发电费用改造为含有无功可调节点的无功附加费用在内的总费用。若发电机运行费用曲线只考虑到 P_{gi}^2 的影响,则式(1)改造为如下的目标函数式

$$F = \min f = \sum_{i\in NP}(A_i + B_i P_{gi} + C_i P_{gi}^2) + \varepsilon \sum_{i\in NQ} Q_{gi}^2 \tag{3}$$

式(3)中,ε 为极小的正数,可以取 $\varepsilon = 10^{-10}$;NQ 是无功可调的发电机节点及补偿节点的集合。因此,无功出力对目标函数值的影响很小,当目标函数达到极小值时,$\sum_{i\in NQ} f_i(P_{gi})$ 也基本达到极小值。包含有等式约束处理的拉格朗日乘数法扩展目标函数式为

$$L = F + \sum_{i\in N}[\lambda_{pi}(P_i + P_{Li} - P_{gi}) + \lambda_{qi}(Q_i + Q_{Li} - Q_{gi})] \tag{4}$$

式(4)中,N 为所有节点的集合。

②把有功可调的发电机节点的有功出力 P_{gi} 和无功可调的发电机节点及补偿节点的无功出力 Q_{gi} 当作状态量处理。经过简化处理,使状态量中的 P_{gi} 和 Q_{gi} 通过 λ_{pi} 和 λ_{qi} 来求取,从而修正方程式的阶数不变。由于可调的 P_{gi} 和 Q_{gi} 都当作状态量处理,因此不等式约束的处理均是针对状态量的处理,在迭代过程中直接对状态量进行限制就可以了。这样就简化了不等式的处理方案,不需要采用罚函数法、线性规划法等其他方法去限制可调的有功出力 P_{gi} 和无功出力 Q_{gi} 的越限问题。

③把变压器的变比 K_{ij} 当作状态量处理,方法是不把变比的偏差 ΔK_{ij} 列入修正方程式,而是通过 $\Delta\theta_i$、ΔU_i、$\Delta\lambda_{pi}$、$\Delta\lambda_{qi}$、$\Delta\theta_j$、ΔU_j、$\Delta\lambda_{pi}$、$\Delta\lambda_{qi}$ 直接来求取 ΔK_{ij}。这样处理后,既保证了修正方程式的阶数不变,又不会影响修正方程式的系数矩阵的稀疏性,使得节点的状态量的求取完全可以按优化编号的次序进行。

④在迭代过程中对修正方程式求解时,引入中间变量,采用替换计算,减小了解修正方程式的计算量。对修正方程式的系数矩阵和常数矩阵中对应于每一个节点的元素矩阵块的内部数据的排列次序根据节点类型的不同作了不同的调整,保证了修正方程式的对角线上的元素矩阵块内部的对角线数据非零,不需采用全选主元或其他方式处理而使修正方程式的求解复杂化。

2　节点功率的计算式

本文采用的节点有功、无功注入功率的计算公

式与传统的计算公式不同,它们不含有节点导纳矩阵的元素,直接采用节点的自导纳和支路的变比、自导纳进行计算。计算公式如下

$$\begin{cases} P_i = U_i^2 g_{ii} - \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} U_i U_j (g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\sin\theta_{ij}) / K_{ij} \\ Q_i = -U_i^2 b_{ii} - \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} U_i U_j (g_{ij}\sin\theta_{ij} - b_{ij}\cos\theta_{ij}) / K_{ij} \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中,g_{ii}、b_{ii}分别表示节点i的自电导和自电纳;g_{ij}、b_{ij}分别表示支路(i,j)本身阻抗的倒数,即自电导和自电纳;K_{ij}表示支路(i,j)本身的变比,对应于非变压器支路(i,j),$K_{ij}=1.0$;θ_{ij}表示节点i与节点j的电压相角差,即$\theta_{ij}=\theta_i-\theta_j$;$n$为系统的总节点数。当不存在支路$(i,j)$时,$g_{ij}$、$b_{ij}$的值均为0.0。

节点i的自电导和自电纳的求取公式为

$$\begin{cases} g_{ii} = g_{io} + \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \frac{1}{k_{ij}'^2} g_{ij} = \sum\limits_{j=1}^{n} g_{ijo} + \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \frac{1}{k_{ij}'^2} g_{ij} \\ b_{ii} = b_{io} + \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \frac{1}{k_{ij}'^2} b_{ij} = \sum\limits_{j=1}^{n} b_{ijo} + \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \frac{1}{k_{ij}'^2} b_{ij} \end{cases}$$

上式中,当节点i为变压器支路(i,j)的非标准变比侧节点时,$k_{ij}'=K_{ij}$;否则,$k_{ij}'=1.0$。g_{ijo}、b_{ijo}分别为支路(i,j) i侧的对地电导和对地电纳。

这样,系统中的支路在处理时就不必再区分是变压器还是线路,可统一处理。这种模型称为重载支路模型(重载是从计算机C++语言中引申而来的)。模型如图1所示。对于线路,参数$k=1.0$;对于变压器,参数$y_c=0.0$。

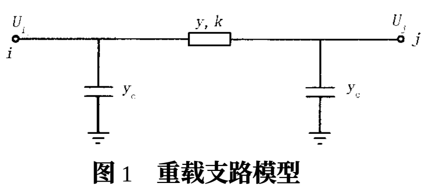

图1 重载支路模型

Fig.1 Overloading branch model

除了参数的计算与传统方法不同之外,在各种电气参数的计算中当用到节点电压幅值时,支路重载法作如下处理:当该节点作为变压器支路非标准变比侧节点时,该节点的电压幅值要除以该变压器变比之后再去计算该支路的功率、电流等参数的值;当该节点作为变压器标准变比侧节点或线路一端的节点时,该节点的电压幅值为本身的电压幅值,直接用去计算该支路的功率、电流等参数的值。

对于式(5),作如下假设

$$\begin{cases} G_{ii} = g_{ii} \\ B_{ii} = -b_{ii} \\ G_{ij} = -(g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\sin\theta_{ij}) / K_{ij}, \quad j \neq i \\ B_{ij} = -(g_{ij}\sin\theta_{ij} - b_{ij}\cos\theta_{ij}) / K_{ij}, \quad j \neq i \end{cases} \tag{6}$$

当不存在支路(i,j)时,G_{ij}、B_{ij}的值均为0.0。式(6)代入式(5)得

$$\begin{cases} P_i = U_i^2 G_{ii} + \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} U_i U_j G_{ij} = \sum\limits_{j=1}^{n} U_i U_j G_{ij} \\ Q_i = U_i^2 B_{ii} + \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} U_i U_j B_{ij} = \sum\limits_{j=1}^{n} U_i U_j B_{ij} \end{cases} \tag{7}$$

3 拉格朗日目标函数式的改造

把式(3)代入式(4)得

$$L = \sum_{i=1}^{l} (A_i + B_i P_{gi} + C_i P_{gi}^2) + \varepsilon \sum_{i=1}^{m} Q_{gi}^2 + \sum_{i=1}^{n} [\lambda_{pi}(P_i + P_{Li} - P_{gi}) + \lambda_{qi}(Q_i + Q_{Li} - Q_{gi})] \tag{8}$$

有功可调的节点个数为l个,即为节点1,2,…,l;无功可调的节点个数为$m(\geq l)$个,即为节点1,2,…,l,$l+1$,…,m;剩余的$n-m$个节点为PQ节点。

根据拉格朗日原理有

$$\begin{cases} \partial L / \partial P_{gi} = 0, \quad i = 1,2,\cdots,l \\ \partial L / \partial Q_{gi} = 0, \quad i = 1,2,\cdots,m \end{cases} \tag{9}$$

而

$$\begin{cases} \partial L / \partial P_{gi} = B_i + 2C_i P_{gi} - \lambda_{pi}, \quad i = 1,2,\cdots,l \\ \partial L / \partial Q_{gi} = 2\varepsilon Q_{gi} - \lambda_{qi}, \quad i = 1,2,\cdots,m \end{cases} \tag{10}$$

由式(9)和式(10)可得

$$P_{gi} = \begin{cases} \dfrac{\lambda_{pi} - B_i}{2C_i}, & i = 1,2,\cdots,l \\ P_{Gi}, & i = l+1, l+2, \cdots, n \end{cases} \tag{11}$$

$$Q_{gi} = \begin{cases} \dfrac{\lambda_{qi}}{2\varepsilon}, & i = 1,2,\cdots,m \\ Q_{Gi}, & i = m+1, m+2, \cdots, n \end{cases} \tag{12}$$

式(11)中P_{Gi}为有功不可调的节点i的给定有功出力,式(12)中Q_{Gi}为无功不可调的节点i的给定无功出力。对于不带发电机和补偿装置的PQ节点,P_{Gi}和Q_{Gi}均为0.0。这样P_{Gi}和Q_{Gi}就可以当作状态量来处理。简化了其对不等式约束的处理。

式(11)和式(12)代入式(8),并令

$$R_i=\begin{cases}\left(A_i-\dfrac{B_i^2}{4C_i}\right)+\left(P_{\mathrm{L}i}+\dfrac{B_i}{2C_i}\right)\lambda_{\mathrm{p}i}-\dfrac{\lambda_{\mathrm{p}i}^2}{4C_i}+Q_{\mathrm{L}i}\lambda_{\mathrm{q}i}-\dfrac{\lambda_{\mathrm{q}i}^2}{4\varepsilon}, \\ \qquad i=1,2,\cdots,l \\ (P_{\mathrm{L}i}-P_{\mathrm{G}i})\lambda_{\mathrm{p}i}+Q_{\mathrm{L}i}\lambda_{\mathrm{q}i}-\dfrac{\lambda_{\mathrm{q}i}^2}{4\varepsilon}, \\ \qquad i=l+1,l+2,\cdots,m \\ (P_{\mathrm{L}i}-P_{\mathrm{G}i})\lambda_{\mathrm{p}i}+(Q_{\mathrm{L}i}-Q_{\mathrm{G}i})\lambda_{\mathrm{q}i}, \\ \qquad i=m+1,m+2,\cdots,n\end{cases}$$

$$S_{ii}=2g_{ii}\lambda_{\mathrm{p}i}-2b_{ii}\lambda_{\mathrm{q}i}=2G_{ii}\lambda_{\mathrm{p}i}+2B_{ii}\lambda_{\mathrm{q}i}$$

$$S_{ij}=G_{ij}\lambda_{\mathrm{p}i}+B_{ij}\lambda_{\mathrm{q}i}+G_{ji}\lambda_{\mathrm{p}j}+B_{ij}\lambda_{\mathrm{q}j}$$

$$T_{ij}=G_{ij}\lambda_{\mathrm{q}i}-B_{ij}\lambda_{\mathrm{p}i}-G_{ji}\lambda_{\mathrm{q}j}+B_{ij}\lambda_{\mathrm{p}j}$$

则有 $S_{ij}=S_{ji}$,$T_{ij}=-T_{ji}$,$\partial S_{ij}/\partial\theta_i=T_{ij}$,$\partial T_{ij}/\partial\theta_i=-S_{ij}$。同时有

$$L=\sum_{i=1}^{n}\left(R_i+\frac{1}{2}U_i^2S_{ii}\right)+\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}U_iU_jS_{ij} \qquad (13)$$

4　考虑变比可调情况下的修正方程式

下面对变比可调支路修正方程式的处理进行说明,其它类型支路情况类似。

假设存在变压器支路(i,j),其变比 K_{ij} 为可调的变比,i 侧为变压器支路的非标准变比侧。则节点 i 和节点 j 的局部修正方程式为

$$\begin{bmatrix}J_{KK} & J_{KXi} & J_{KXj} & J_{KXk}\\ J_{KXi}^T & W_{ii} & W_{ij} & \cdots\\ J_{KXj}^T & W_{ij}^T & W_{jj} & \cdots\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta K_{ij}\\ \Delta X_i\\ \Delta X_j\\ \cdots\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\partial L/\partial K_{ij}\\ -\partial L/\partial X_i\\ -\partial L/\partial X_j\end{bmatrix} \qquad (14)$$

式(13)对 K_{ij} 求偏导,得

$$\frac{\partial L}{\partial K_{ij}}=-\frac{2U_i^2}{K_{ij}^3}(\lambda_{\mathrm{p}i}g_{ij}-\lambda_{\mathrm{q}i}b_{ij})-\frac{U_iU_j}{K_{ij}}S_{ij} \qquad (15)$$

由式(15)可知,$\partial L/\partial K_{ij}$ 对状态量 ΔK 和 ΔX 再次求偏导所得的 Hessian 矩阵行中只有对角元 J_{KK} 和非对角元 J_{KXi}、J_{KXj} 为非零元素块,其它元素 J_{KXk} 均为零元素块。状态量 ΔK_{ij} 所产生的 Hessian 矩阵列也只有对角元 J_{KK} 和非对角元 J_{KXi}^T、J_{KXj}^T 为非零元素块,其它元素均为零元素块。而节点 i 和节点 j 的元素矩阵块中 W_{ii}、W_{ij}、W_{ji}、W_{jj} 均为非零元素块。所以在求解修正方程式的消去过程中,当消去 J_{KXi}^T、J_{KXj}^T 元素块时只影响元素块中 W_{ii}、W_{ij}、W_{ji}、W_{jj} 元素矩阵块内部数据的值,其它元素矩阵块内部数据的值均不受影响,也不会添加注入元素块。这样就保证了系数矩阵的稀疏性。

由式(15)对各状态量求偏导,得式(14)中各元素矩阵块的值为

$$J_{KK}=\frac{\partial^2L}{\partial K_{ij}^2}=\frac{6U_i^2}{K_{ij}^4}(\lambda_{\mathrm{p}i}g_{ij}-\lambda_{\mathrm{q}i}b_{ij})+\frac{U_iU_j}{K_{ij}^2}S_{ij}$$

$$J_{KXi}^T=\begin{bmatrix}J_{K\theta i}\\ J_{KUi}\\ J_{K\mathrm{p}i}\\ J_{K\mathrm{q}i}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-U_iU_jT_{ij}/K_{ij}\\ -4U_i(\lambda_{\mathrm{p}i}g_{ij}-\lambda_{\mathrm{q}i}b_{ij})/K_{ij}^3-U_jS_{ij}/K_{ij}\\ -2U_i^2g_{ij}/K_{ij}^3-U_iU_jG_{ij}/K_{ij}\\ 2U_i^2b_{ij}/K_{ij}^3-U_iU_jB_{ij}/K_{ij}\end{bmatrix}$$

$$J_{KXj}^T=\begin{bmatrix}J_{K\theta j}\\ J_{KUj}\\ J_{K\mathrm{p}j}\\ J_{K\mathrm{q}j}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}U_iU_jT_{ij}/K_{ij}\\ -U_iS_{ij}/K_{ij}\\ -U_iU_jG_{ji}/K_{ij}\\ -U_iU_jB_{ji}/K_{ij}\end{bmatrix}$$

处理式(14),消去 J_{KXi}^T、J_{KXj}^T 元素块,则得到

$$\begin{bmatrix}1 & \dfrac{J_{KXi}}{J_{KK}} & \dfrac{J_{KXj}}{J_{KK}} & 0\\ 0 & W_{ii}-\dfrac{J_{KXi}^TJ_{KXi}}{J_{KK}} & W_{ij}-\dfrac{J_{KXi}^TJ_{KXj}}{J_{KK}} & \cdots\\ 0 & W_{ij}^T-\dfrac{J_{KXj}^TJ_{KXi}}{J_{KK}} & W_{jj}-\dfrac{J_{KXj}^TJ_{KXj}}{J_{KK}} & \cdots\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta K_{ij}\\ \Delta X_i\\ \Delta X_j\\ \cdots\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\dfrac{\partial L}{J_{KK}\partial K_{ij}}\\ -\dfrac{\partial L}{\partial X_i}+\dfrac{J_{KXi}^T}{J_{KK}}\dfrac{\partial L}{\partial K_{ij}}\\ -\dfrac{\partial L}{\partial X_j}+\dfrac{J_{KXj}^T}{J_{KK}}\dfrac{\partial L}{\partial K_{ij}}\end{bmatrix} \qquad (16)$$

定义

$$\begin{cases}J'_{KXi}=\dfrac{J_{KXi}}{J_{KK}}=\begin{bmatrix}\dfrac{J_{K\theta i}}{J_{KK}} & \dfrac{J_{KUi}}{J_{KK}} & \dfrac{J_{Kpi}}{J_{KK}} & \dfrac{J_{Kqi}}{J_{KK}}\end{bmatrix}\\ J'_{KXj}=\dfrac{J_{KXj}}{J_{KK}}=\begin{bmatrix}\dfrac{J_{K\theta j}}{J_{KK}} & \dfrac{J_{KUj}}{J_{KK}} & \dfrac{J_{Kpj}}{J_{KK}} & \dfrac{J_{Kqj}}{J_{KK}}\end{bmatrix}\end{cases}$$

则式(16)等效为

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}W_{ii}-J_{KXi}^TJ'_{KXi} & W_{ij}-J_{KXi}^TJ'_{KXj} & \cdots\\ [W_{ij}-J_{KXi}^TJ'_{KXj}]^T & W_{jj}-J_{KXj}^TJ'_{KXj} & \cdots\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta X_i\\ \Delta X_j\\ \cdots\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\dfrac{\partial L}{\partial X_i}+[J'_{KXi}]^T\dfrac{\partial L}{\partial K_{ij}}\\ -\dfrac{\partial L}{\partial X_j}+[J'_{KXj}]^T\dfrac{\partial L}{\partial K_{ij}}\end{bmatrix}\\ \Delta K_{ij}=-\dfrac{\partial L}{J_{KK}\partial K_{ij}}-J'_{KXi}\Delta X_i-J'_{KXj}\Delta X_j\end{cases} \qquad (17)$$

此即变比可调支路的修正方程式。这样处理后,既保证了修正方程式的阶数不变,又不会影响修正方程式的系数矩阵的稀疏性,使得节点的状态量完全可以按优化编号的次序来求取。

5　不等式约束的处理

本文所考虑的不等式约束条件有:

①节点电压幅值约束

$$U_{i\min} \le U_i \le U_{i\max}, i \in N$$

②有载调压变压器变比约束

$$K_{ij\min} \le K_{ij} \le K_{ij\max}, (i, j) \in TB$$

③发电机有功出力和无功出力约束

$$P_{gi\min} \le P_{gi} \le P_{gi\max}, i \in NG$$

$$Q_{gi\min} \le Q_{gi} \le Q_{gi\max}, i \in NG$$

④补偿节点无功出力约束

$$Q_{ci\min} \le Q_{ci} \le Q_{ci\max}, i \in NC$$

⑤支路承载有功功率约束

$$|P_{ij}| \le P_{ij\max}, |P_{ji}| \le P_{ij\max}, i \in NB$$

这些受约束的电气参数均可作为状态量,所以可采用在迭代过程中直接限制的方法处理。同时,当同时存在多个电气量越限时,不需要对每一个越限的电气参数均进行约束,处理方法可以参照文献[3]。

6 解修正方程式中的处理

解修正方程式中还需要处理消去过程中出现对角元为零的情况。对应于节点 i,在修正方程式中,其对角元素矩阵块为 W_{ii}。当节点 i 不连接有载调压变压器时

$$W_{ii} = \begin{bmatrix} S_{ii} - \frac{\partial L}{U_i \partial U_i} & \frac{\partial L}{U_i^2 \partial \theta_i} & -b_{ii} - \frac{Q_i}{U_i^2} & -g_{ii} + \frac{P_i}{U_i^2} \\ \frac{\partial L}{U_i^2 \partial \theta_i} & S_{ii} & g_{ii} + \frac{P_i}{U_i^2} & -b_{ii} + \frac{Q_i}{U_i^2} \\ -b_{ii} - \frac{Q_i}{U_i^2} & g_{ii} + \frac{P_i}{U_i^2} & -\frac{1}{2C_i U_i^2}\text{或}0 & 0 \\ -g_{ii} + \frac{P_i}{U_i^2} & -b_{ii} + \frac{Q_i}{U_i^2} & 0 & -\frac{1}{2\varepsilon U_i^2}\text{或}0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = \begin{bmatrix} -\sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \ne i}}^{n} U_j T_{ij} \\ -\sum\limits_{j=1}^{n} U_j S_{ij} \\ \frac{P_{gi} - P_{Li} - P_i}{U_i} \\ \frac{Q_{gi} - Q_{Li} - Q_i}{U_i} \end{bmatrix}$$

可见 W_{ii} 的对角线元素有可能为零。为了使其不为零,本文根据节点类型的不同,对 W_{ii}、W_{ij} 内部元素的排列次序作不同的调整。本文的节点类型分为以下几类:$V\theta$ 节点(即平衡节点),N 节点(有功、无功均可调,电压幅值和相角均不给定),V 节点(有功、无功均可调,电压幅值给定),PV 节点(无功可调,有功和电压幅值给定),P 节点(即无功补偿节点,无功可调,有功给定,电压幅值和相角均不给定),PQ 节点(有功、无功均给定,电压幅值和相角均不给定)。若节点 i 为 N 节点,或 P 节点,或 PQ 节点,作如下调整

$$W_{ii} = \begin{bmatrix} -b_{ii} - \frac{Q_i}{U_i^2} & g_{ii} + \frac{P_i}{U_i^2} & \frac{-1}{2C_i U_i^2}\text{或}0 & 0 \\ -g_{ii} + \frac{P_i}{U_i^2} & -b_{ii} + \frac{Q_i}{U_i^2} & 0 & \frac{-1}{2\varepsilon U_i^2}\text{或}0 \\ S_{ii} - \frac{\partial L}{U_i \partial U_i} & \frac{\partial L}{U_i^2 \partial \theta_i} & -b_{ii} - \frac{Q_i}{U_i^2} & -g_{ii} + \frac{P_i}{U_i^2} \\ \frac{\partial L}{U_i^2 \partial \theta_i} & S_{ii} & g_{ii} + \frac{P_i}{U_i^2} & -b_{ii} + \frac{Q_i}{U_i^2} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = \begin{bmatrix} \frac{P_{gi} - P_{Li} - P_i}{U_i} \\ \frac{Q_{gi} - Q_{Li} - Q_i}{U_i} \\ -\sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \ne i}}^{n} U_j T_{ij} \\ -\sum\limits_{j=1}^{n} U_j S_{ij} \end{bmatrix}$$

对于其它类型的节点,也可做类似调整。这样就保证了修正方程式的对角线上的元素矩阵块内部的对角线数据非零,不需采用全选主元或其他方式处理而使修正方程式的求解复杂化。

7 计算过程

计算过程大致可以分为以下几步:

①初始节点数据,如节点类型、电压限值、功率(即 λ_{pi}、λ_{qi})限值、电压初值,发电机节点的有功耗量函数系数,补偿节点的补充无功情况等。

②初始支路数据,如支路的自导纳、对地导纳,有载调压变压器的分接头情况等。并且计算所有节点的自导纳。

③计算节点的注入有功、无功功率,根据节点功率平衡得到有功可调节点的有功出力和无功可调节点的无功出力,初始节点的拉格朗日乘子 λ_{pi}、λ_{qi}。

④计算修正方程式中各变量的值:G_{ij}、B_{ij}、G_{ji}、B_{ji}、S_{ij}、T_{ij}、W_{ij}[16]、$\partial L / \partial \theta_i$、$\partial L / \partial U_i$、$\partial L / \partial \lambda_{pi}$、$\partial L / \partial \lambda_{qi}$、$W_{ii}$[16]。

⑤前推回代解修正方程式,修正节点的状态量

θ_i、U_i、λ_{pi}、λ_{qi},根据公式(11)、(12)计算节点的 P_{gi} 和 Q_{gi},根据公式(17)计算节点的状态量 K_{ij}。

⑥根据公式(7)计算节点的注入功率 P_i 和 Q_i,判断最大的节点功率偏差 ΔP_i 和 ΔQ_i 是否小于给定的极小值。若小于,则终止迭代;否则,转入步骤④,进行下一次迭代。

8　结论

为了验证本文的处理方法,将其用于一些测试系统和现场工程,计算结果反映了该方法确实可行。它具有以下一些特征:

(1)程序内部处理简捷,计算速度快;

(2)收敛性能良好,计算结果准确可靠。

参考文献:

[1]　柳焯.最优化原理及其在电力系统中的应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1988.

[2]　Sun,D. I. et al. Optimal Power Flow by Newton Approach. IEEE Trans. On PAS, 1984, 103(10): 2864 - 2880.

[3]　王宪荣.潮流和最优潮流的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学博士论文,1989.

[4]　严正,等.优化潮流牛顿算法的研究及应用[J].清华大学学报(自然科学版),1989,29(1).

[5]　王宪荣,等.快速解耦牛顿法最优潮流[J].中国电机工程学报[J],1994,14(4).

[6]　张力平,何大愚,朱太秀.牛顿法最优潮流和最优无功补偿[J].中国电机工程学报,1987,7(1).

收稿日期: 2002-08-19;　**修回日期**: 2002-11-20

作者简介:

王永刚(1969 -),男,博士,从事电力系统分析与控制方面的研究;

彭世康,男,硕士研究生,从事电力系统分析方面的研究;

靳现林,男,硕士,从事电力系统控制方面的研究。

Improved Newton optimal power flow algorithm

WANG Yong-gang, PENG Shi-kang, JIN Xian-lin

(Beijing Xuji Electrical Corporation, Beijing 100085, China)

Abstract: Basing on the Newton Power Flow Algorithm, this paper presents a new method to solve this problem. Considering the active and reactive power of generator nodes and the reactive power of the compensated nodes as the state variables, the improved method calculates P_{gi} and Q_{gi} through Lagrangian multipliers. This method simplifies the way of dealing the inequalities without using of the penalty Functions. Numerical results for example systems show that the new method can accelerate the calculate speed and at the same time get better convergence.

Key words: Newton method; optimal power flow; algorithm