

含潮流控制器的改进节点附加注入法潮流计算

易善军, 郭志忠

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 通过对常规节点附加注入法和常规牛顿法的剖析比较, 得出了常规节点附加注入法收敛性存在问题的主要原因在于等效附加注入项处理得不够全面。在此基础上, 提出了改进的节点附加注入法, 该方法在潮流方程的节点功率不平衡量中引入新的修正项, 使潮流的收敛性得到改善。另外, 针对常规节点附加注入 PQ 分解法的线性收敛特性, 应用斯梯芬算法或埃特金²加速收敛手续对其进行加速处理, 使算法的收敛性在一定程度上也得到了进一步改善, 并使计算效率得到比较明显的提高。算例分析结果说明了上述两种方法的良好效果。

关键词: 电力系统; 潮流; 节点附加注入法; 潮流控制器; 加速

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)23-0005-06

0 引言

随着灵活交流输电系统 (FACTS) 技术的提出和发展, 越来越多的潮流控制器如: 可控串联补偿器 (TCSC)、可控移相器 (TCPS)、统一潮流控制器 (UPFC) 和相间功率控制器 (IPC) 等投入电力系统运行。为了评估这些潮流控制器对电力系统的影响, 首先需要具备计及潮流控制器作用的潮流分析工具。

文献[1~3]从求解非线性方程组的一般方法出发, 通过列写计及潮流控制器影响的系统节点功率平衡方程、潮流目标控制方程, 实现系统潮流状态的计算和潮流控制器控制变量的联立求解。该方法保留了牛顿法收敛性好的特性, 但同时也继承了牛顿法计算效率低的弱点; 另外, 当包含多种类、多数量的潮流控制器时, 基于上述方式开发的程序对常规牛顿法程序代码的利用率将大大降低, 从而增加了程序的复杂程度和程序的开发成本。文献[4,5]提出的节点附加注入法在常规 PQ 分解法潮流程序中计及了潮流控制器的作用, 它在每次潮流迭代中只需修改节点不平衡量, 而原有网络解算结构(包括导纳矩阵及其因子表)保持不变, 这样既可以充分利用原有的潮流程序代码, 又可以保留常规 PQ 分解法每次迭代计算量小的优点。但当问题需要计及多种类、多数量的潮流控制器或方式较重时, 其收敛性有时也不尽人意, 因此需要进一步针对节点附加注入法存在的弱点加以克服和改进。

本文在剖析了常规节点附加注入法收敛性问题

的原因后, 提出了改进的节点附加注入法。改进的方法由于在潮流方程的节点功率不平衡量中引入了新的修正项, 使算法的收敛阶得到提高, 收敛性得到改善。另外, 本文还针对常规节点附加注入 PQ 分解法的线性收敛特性, 利用斯梯芬算法或埃特金²加速收敛手续^[6]对其进行加速处理, 使原方法达到或接近二阶收敛效果。因此, 本文最终提出的两种改进方法将是具有超出线性收敛阶且单步计算量与 PQ 分解法几乎等价的能够分析潮流控制器作用的潮流算法。最后, 本文通过算例说明了所提方法的良好效果。

1 潮流控制器控制参数给定条件下的改进节点附加注入法

1.1 常规牛顿法的剖析

当求解潮流控制器控制参数 U 给定条件下的电力系统潮流状态时, 以节点导纳矩阵和节点注入功率形式表示的潮流方程组为:

$$F(\underline{V}, U) \underline{S}_N - (\text{diag } \underline{V})(\underline{Y}\underline{V})^* = 0 \quad (1)$$

式中: \underline{V} 为节点复电压向量; \underline{S}_N 为给定的节点注入复功率向量; \underline{Y} 为计及潮流控制器参数 U 影响的节点导纳矩阵, $\underline{0}$ 为零值向量, 对角阵 $\text{diag } \underline{V} =$

$$\begin{bmatrix} V_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & V_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & V_n \end{bmatrix}$$

将方程组(1)分块得:

$$\begin{bmatrix} F(\underline{V}, \underline{Y}, U) \\ F(\underline{V}, \underline{Y}, U) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}_N \\ \underline{S}_N \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \text{diag}(Y) & [0] & - \\ [0] & - & \text{diag}(Y) \end{bmatrix} \left\{ (Y_{\text{NU}} + Y_{\text{U}}) \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} \right\}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:下标 NU 对应剔除潮流控制器安装支路两端节点后的所有其余节点,下标 U 对应所有潮流控制器所在支路两端的节点;导纳矩阵下标 NU 表示未安装潮流控制器时的情形,U 表示安装潮流控制器后引起的导纳矩阵变化部分,这两部分按照节点集合和 又可分块成如下形式:

$$Y_{\text{NU}} = \begin{bmatrix} Y_{\text{NU}} & - & Y_{\text{NU}} & - \\ Y_{\text{NU}} & - & Y_{\text{NU}} & - \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y_{\text{U}} = \begin{bmatrix} Y_{\text{U}} & - & Y_{\text{U}} & - \\ Y_{\text{U}} & - & Y_{\text{U}} & - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{\text{U}} & - & 0_{\text{U}} & - \\ 0_{\text{U}} & - & 0_{\text{U}} & - \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中:由于潮流控制器只对其所在支路的两端节点的自导纳和互导纳有影响,而对其余节点间的自导纳和互导纳没有影响,故 Y_{U} 有 3 块为零阵(式(4)所示)。

当将式(3)和式(4)代入式(2)并用牛顿法解算潮流方程组时,其修正方程组为:

$$(J_{\text{NU}} + J_{\text{U}}) \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\text{N}} \\ S_{\text{N}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: J_{NU} 和 J_{U} 为 Jacobian 矩阵,它们分别与式(2)中的 Y_{NU} 和 Y_{U} 对应,并有如下分块形式:

$$J_{\text{NU}} = \begin{bmatrix} J_{\text{NU}} & - & J_{\text{NU}} & - \\ J_{\text{NU}} & - & J_{\text{NU}} & - \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$J_{\text{U}} = \begin{bmatrix} J_{\text{U}} & - & J_{\text{U}} & - \\ J_{\text{U}} & - & J_{\text{U}} & - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{\text{U}} & - & 0_{\text{U}} & - \\ 0_{\text{U}} & - & 0_{\text{U}} & - \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(5)的右端功率不平衡项由式(2)求出,它包括如下 3 部分:

$$\begin{bmatrix} S_{\text{N}} \\ S_{\text{N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\text{N}} \\ S_{\text{N}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{diag}(Y) & [0] & - \\ [0] & - & \text{diag}(Y) \end{bmatrix} \cdot \left(Y_{\text{NU}} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} \right)^* - \begin{bmatrix} \text{diag}(Y) & [0] & - \\ [0] & - & \text{diag}(Y) \end{bmatrix} \left(Y_{\text{U}} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} \right)^* \quad (8)$$

第 1 项为节点固定注入功率项;第 2 项为不含潮流控制器时节点出线功率累加项;第 3 项为在第 2 项基础上计及潮流控制器作用时的节点附加注入功率项。

一般地,当初值选择较好时,牛顿法具有良好的

收敛特性。但当分析具有多个潮流控制器的系统潮流解时,原来无潮流控制器时的牛顿法程序代码的利用率将大大降低,使得新的考虑多个不同种类的潮流控制器的牛顿法潮流的编程变得相对复杂。因此,通常的分析往往采用下面的节点附加注入法,以减轻程序设计的工作量。

1.2 常规节点附加注入法与常规牛顿法的比较

常规的节点附加注入法的修正方程组可以表述为:

$$J_{\text{NU}} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\text{N}} \\ S_{\text{N}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

方程组的左边与不考虑潮流控制器时的牛顿法修正方程组完全一样,而右边多了个计及潮流控制器作用的节点附加注入功率项 S_{NAIP} ,其形式由式(8)右端第 3 项展开后得:

$$S_{\text{NAIP}} = \begin{bmatrix} S_{\text{NAIP}} \\ S_{\text{NAIP}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ \text{diag}(Y) (Y_{\text{U}} - Y_{\text{U}}) \end{bmatrix}^* \quad (10)$$

通常,当潮流控制器的个数较少或潮流控制器的参数调节幅度不大时,利用式(9)进行潮流计算的收敛性较好,但当潮流控制器的个数较多或潮流控制器的参数调节幅度较大时,利用式(9)进行潮流计算的收敛性将会变差,甚至不收敛,而此时利用式(5)进行潮流计算时的收敛性往往仍较好,更不至于出现不收敛的现象。究其原因,比较式(9)和式(5)后就会发现,在利用附加注入法求解修正方程组的过程中,式(9)相对于式(5)的左边少了 $J_{\text{U}} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix}$ 项,

该项在潮流迭代初期,往往具有相当的数值,若不计它的作用,则对收敛性影响较大。因此, $J_{\text{U}} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix}$ 项的正确处理,将成为改善常规节点附加注入法收敛性的关键。

1.3 改进的节点附加注入法

由 1.1 和 1.2 节的分析结论可以得到改进的节点附加注入法的修正方程组为:

$$J_{\text{NU}} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\text{N}} \\ S_{\text{N}} \end{bmatrix} - J_{\text{U}} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\text{N}} \\ S_{\text{N}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{diag}(Y) & [0] & - \\ [0] & - & \text{diag}(Y) \end{bmatrix} \left(Y_{\text{NU}} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} \right)^* + S_{\text{NAIP}}^{\text{NEW}} \quad (11)$$

其中: $S_{\text{NAIP}}^{\text{NEW}}$ 为修正后的节点附加注入功率项,具体形式如下:

$$\underline{S}_{\text{NAIP}}^{\text{NEW}} = - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \text{diag}(\underline{V}) (Y_U - \underline{V})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ J_U - \underline{V} \end{bmatrix} \quad (12)$$

因为式(11)右端项 $\underline{S}_{\text{NAIP}}^{\text{NEW}}$ 中含有待求的电压修正量 \underline{V} ,故为隐式形式。为了使用显式形式进行迭代,可以将方程右端的 \underline{V} 用前一次的修正量乘以某一修正系数($0 < w < 1$)代替,即第 $k+1$ 次迭代公式变为:

$$\underline{S}_{\text{NAIP}}^{\text{NEW}(k)} = - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \text{diag}(\underline{V}^{(k)}) (Y_U - \underline{V}^{(k)})^* \end{bmatrix} - w \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ J_U^{(k)} - \underline{V}^{(k-1)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J_{\text{NU}}^{(k)} \begin{bmatrix} \underline{V}^{(k)} \\ \underline{V}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{\text{N}} \\ \underline{S}_{\text{N}} \end{bmatrix} - J_U^{(k)} \begin{bmatrix} \underline{V}^{(k-1)} \\ \underline{V}^{(k-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{\text{N}} \\ \underline{S}_{\text{N}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{diag}(\underline{V}^{(k)}) & [0] \\ [0] & \text{diag}(\underline{V}^{(k)}) \end{bmatrix} \left(Y_{\text{NU}} \begin{bmatrix} \underline{V}^{(k)} \\ \underline{V}^{(k)} \end{bmatrix} \right)^* + \underline{S}_{\text{NAIP}}^{\text{NEW}(k)} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{V}^{(k+1)} \\ \underline{V}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V}^{(k)} \\ \underline{V}^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{V}^{(k)} \\ \underline{V}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由式(11)可见,修正后的节点附加注入功率项 $\underline{S}_{\text{NAIP}}^{\text{NEW}}$ 只对安装潮流控制器的线路两端节点的注入功率进行了修正,而对常规潮流的主要程序结构没有影响,即雅可比矩阵和不含潮流控制器的常规潮流一致,因此,为提高计算效率,还可以将式(11)用PQ分解法进行改造,并采用与式(13)~(15)类似的改进措施,从而起到改善收敛性和提高计算效率的双重效果。

2 潮流控制器控制目标给定条件下的改进节点附加注入法

2.1 常规牛顿法的剖析

当求解潮流控制器控制目标给定而控制参数 \underline{U} 待求条件下的电力系统潮流状态时,潮流方程组及潮流控制器控制目标方程组可以表述如下:

$$\begin{bmatrix} F(\underline{V}, \underline{V}, \underline{U}) \\ F(\underline{V}, \underline{V}, \underline{U}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{\text{N}} \\ \underline{S}_{\text{N}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{diag}(\underline{V}) & [0] \\ [0] & \text{diag}(\underline{V}) \end{bmatrix} \left\{ (Y_{\text{NU}} + Y_U) \begin{bmatrix} \underline{V} \\ \underline{V} \end{bmatrix} \right\}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$H(\underline{V}, \underline{V}, \underline{U}) = \mathbf{0} \quad (17)$$

其中:式(16)是潮流方程组,式(17)是潮流控制器控

制目标方程组。式(16)、(17)中的下标说明及符号的含义同1.1节。

当用牛顿法解算方程组(16)、(17)时,其修正方程组为:

$$\begin{bmatrix} J_{\text{NU}} & & J_{\text{NU}} & & J_{\text{FH}} \\ J_{\text{NU}} & & J_{\text{NU}} & + J_U & J_{\text{FH}} \\ & J_{\text{HF}} & & J_{\text{HF}} & J_{\text{HH}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V} \\ \underline{V} \\ \underline{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{\text{N}} \\ \underline{S}_{\text{N}} \\ H \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中:式(18)Jacobian矩阵的左上4块子阵的构成形式与式(5)、(6)和(7)完全相同,式(18)右端功率不平衡项 $\begin{bmatrix} \underline{S}_{\text{N}} \\ \underline{S}_{\text{N}} \end{bmatrix}$ 与式(8)的形式也完全相同。另外,通常由于 $F(\underline{V}, \underline{V}, \underline{U})$ 中并不显含控制变量 \underline{U} 、 $H(\underline{V}, \underline{V}, \underline{U})$ 中并不显含电压变量 \underline{V} ,所以式(18)Jacobian矩阵的子块 J_{FH} 和 J_{HF} 均是零阵。

与潮流控制器控制参数 \underline{U} 给定条件下的情形类似,在潮流控制器控制目标给定的情形下,当初值选择较好时,基于式(18)的牛顿法一般也具有良好的收敛特性。但当分析具有多个潮流控制器的系统潮流解时,原来无潮流控制器时的牛顿法程序代码的利用率将大大降低,使得新的考虑多个不同种类的潮流控制器的牛顿法潮流的编程变的相对复杂。因此,通常的分析往往并不直接基于式(18)对方程组联立求解,而是采用下面的节点附加注入法和交替求解法相结合的方法,以减轻程序设计的工作量。

2.2 常规节点附加注入法的交替求解与常规牛顿法联立求解的比较

常规节点附加注入法的交替求解公式可以表述为:

$$J_{\text{NU}} \begin{bmatrix} \underline{V} \\ \underline{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{\text{N}} \\ \underline{S}_{\text{N}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$J_{\text{HH}} \underline{U} = H \quad (20)$$

通常,当潮流控制器的个数较少且潮流控制器的控制目标容易实现时,利用式(19)和(20)进行交替迭代,收敛性较好,但当潮流控制器的个数较多或潮流控制器的控制目标不易实现时,利用式(19)和(20)进行交替迭代的收敛性将会变差,甚至很容易不收敛,而此时利用式(18)进行联立计算时的收敛性往往仍较好,更不至于出现不收敛的现象。究其原因,比较式(19)、(20)和式(18)后就会发现,式

(19) 相对于式 (18) 左边的对应部分少了

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_U \quad \mathbf{Y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_{FH} \quad \mathbf{U} \end{bmatrix} \text{项, 式 (20) 相对于式}$$

(18) 左边的对应部分少了 $\mathbf{J}_{HF} \quad \mathbf{Y}$ 项, 这些项在潮流迭代初期, 往往具有相当的数值, 若不计它的作用, 则对收敛性影响较大。因此, 上述所少项的正确处理, 将成为改善常规节点附加注入法交替求解收敛性的关键。

2.3 改进的节点附加注入法及交替求解过程

由 2.1 和 2.2 的分析结论可以得到改进的节点附加注入法及交替求解过程的修正方程组为:

$$\mathbf{J}_{NU} \begin{bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_N \\ \mathbf{S}_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{diag}(\mathbf{Y}) & [0] \\ [0] & \text{diag}(\mathbf{Y}) \end{bmatrix} \left(\mathbf{Y}_{NU} \begin{bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} \right)^* + \frac{\mathbf{S}_{NAIP}^{NEW}}{\mathbf{S}_{NAIP}} \quad (21)$$

$$\mathbf{J}_{HH} \quad \mathbf{U} = \mathbf{H} - \mathbf{J}_{HF} \quad \mathbf{Y} \quad (22)$$

其中: \mathbf{S}_{NAIP}^{NEW} 为修正后的节点附加注入功率项, 具体形式如下:

$$\frac{\mathbf{S}_{NAIP}^{NEW}}{\mathbf{S}_{NAIP}} = - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \text{diag}(\mathbf{Y}) (\mathbf{Y}_U \quad \mathbf{Y})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_U \quad \mathbf{Y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_{FH} \quad \mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (23)$$

因为式 (21) 右端 $\frac{\mathbf{S}_{NAIP}^{NEW}}{\mathbf{S}_{NAIP}}$ 项中含有待求的电压修正量 \mathbf{Y} 和潮流控制参数修正量 \mathbf{U} , 故为隐式形式。为了使用显式形式进行迭代, 可以将式 (21) 右端的 \mathbf{Y} 和 \mathbf{U} 用前一次的修正量乘以修正系数 ($0 < w_1 < 1$ 和 $0 < w_2 < 1$) 代替, 即第 $k+1$ 次迭代公式变为:

$$\frac{\mathbf{S}_{NAIP}^{NEW(k)}}{\mathbf{S}_{NAIP}} = - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \text{diag}(\mathbf{Y}^{(k)}) (\mathbf{Y}_U \quad \mathbf{Y}^{(k)})^* \end{bmatrix} - w_1 \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_U^{(k)} \quad \mathbf{Y}^{(k-1)} \end{bmatrix} - w_2 \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_{FH}^{(k)} \quad \mathbf{U}^{(k-1)} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{J}_{NU}^k \begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_N \\ \mathbf{S}_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{diag}(\mathbf{Y}^{(k)}) & [0] \\ [0] & \text{diag}(\mathbf{Y}^{(k)}) \end{bmatrix} \left(\mathbf{Y}_{NU} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} \right)^* + \frac{\mathbf{S}_{NAIP}^{NEW(k)}}{\mathbf{S}_{NAIP}} \quad (25)$$

$$\mathbf{J}_{HH}^{(k)} \quad \mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{H}^{(k)} - \mathbf{J}_{HF}^{(k)} \quad \mathbf{Y}^{(k)} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{(k+1)} \\ \mathbf{U}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{U}^{(k+1)} = \mathbf{U}^{(k)} - \mathbf{U}^{(k)} \quad (28)$$

由式 (21) 可见, 修正后的节点附加注入功率项 $\frac{\mathbf{S}_{NAIP}^{NEW}}{\mathbf{S}_{NAIP}}$ 只对安装潮流控制器的线路两端节点的注入功率进行了修正, 而对常规潮流的主要程序结构没有影响, 即雅可比矩阵和不含潮流控制器的常规潮流一致, 因此, 为提高计算效率, 还可以将式 (21) 用 PQ 分解法进行改造, 并采用与式 (24) ~ (28) 类似的改进措施, 从而起到改善收敛性和提高计算效率的双重效果。

3 常规节点附加注入 PQ 分解法的加速处理

对线性收敛序列 $\{x_n\}$, 设其真解为 x^c , 则误差项 $e_n = x_n - x^c$ 满足关系 $\lim_n \left| \frac{e_{n+1}}{e_n} \right| = \lambda$, 为常数且 $0 < \lambda < 1$ 。根据斯梯芬算法或埃特金²加速收敛手续^[6], 若设 e_n 之间具有相同的符号, 则有 $x_{n+1} - x^c = (x_n - x^c)$ 和 $x_{n+2} - x^c = (x_{n+1} - x^c)$, 将两式相除整理得:

$$x^c = x_{n+2} - \frac{(x_{n+2} - x_{n+1})^2}{x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n} \quad (29)$$

于是可以构造如下校正公式:

$$\hat{x}_{n+2} = x_{n+2} - \frac{(x_{n+2} - \hat{x}_{n+1})^2}{x_{n+2} - 2\hat{x}_{n+1} + \hat{x}_n} \quad (30)$$

由式 (30) 可知: 在正常过程求得 x_{n+2} 后, 就可以利用该值及先前保留的校正值 \hat{x}_{n+1} 和 \hat{x}_n 求出 x_{n+2} 的校正值, 它比 x_{n+2} 具有更好的逼近真解 x^c 的特性。

由于常规节点附加注入 PQ 分解法具有线性收敛特性, 因此本文可以将上述加速措施应用于常规节点附加注入 PQ 分解法, 对其求出的系统节点电压幅值和相角等变量进行校正, 从而使整个迭代过程的收敛性得到进一步改善, 计算效率得到进一步提高。

上述改进是在常规节点附加注入 PQ 分解法的基础上进行的, 它对程序代码的扩充量很小, 只需在每次迭代计算后通过保存的几次状态值进行如式 (30) 形式的校正即可, 因此, 此改进方法的改进成本是很小的。

需要说明的是, 斯梯芬或埃特金²加速措施必须针对线性收敛序列进行, 若收敛序列超出线性收敛阶, 则加速效果就会明显下降, 有时甚至会起反面效果。由于第 1、2 节提出的通过附加注入功率项的修正对常规节点附加注入 PQ 分解法进行改进后的收敛阶已超出 1, 因此一般不对它们再施加强梯芬

或埃特金²加速措施,而只是停留在对常规节点附加注入 PQ 分解法施加加速措施。从这种角度而言,本文实际上是从两种数学途径对常规节点附加注入 PQ 分解法进行了改进,途径 1 就是通过附加注入功率项的修正进行改进,途径 2 就是通过斯梯芬或埃特金²加速措施进行改进。另外,关于具体改进效果的比较将在下节通过算例进一步说明。

4 算例分析

本文就多个系统进行了分析,论证了本文方法的正确性。作为算例,现就 10 机 39 节点 New Eng-

land 系统分析如下^[7]。其中,安装的潮流控制器为相间功率控制器(IPC)。下列各表中,A 代表常规节点附加注入 PQ 分解法,B 代表改进节点附加注入 PQ 分解法,C 代表对 A 进行斯梯芬或埃特金²加速处理后的方法,D 代表对 B 进行斯梯芬或埃特金²加速处理后的方法。

4.1 控制参数给定时的算例

表 1 给出了算例系统不同计算条件下的潮流收敛情况。其中,控制器参数电感电纳 B_1 和电容电纳 B_2 是给定的, P_L 和 Q_L 为 IPC 所在线路右节点侧支路的计算潮流。

表 1 新英格兰 39 节点系统算例(单位:标么值)

Tab. 1 Samples of the New England 39-bus system (pu)

条件	B_1	B_2	P_L	Q_L	收敛次数			
					A	B	C	D
1	- 1.11	1.98	2.673 49	- 0.414 06	85	35	46	32
2	- 1.50	1.50	2.740 88	- 0.100 78	51	21	31	28
3	- 0.40	0.50	0.845 00	- 0.129 31	45	23	27	19
4	- 1.11	1.98	2.675 61	- 0.442 77	88	42	54	40
	- 0.40	0.50	0.855 13	- 0.128 36				
5	- 1.50	1.50	2.717 25	- 0.062 04	67	33	39	35
	- 0.40	0.50	0.862 63	- 0.133 06				

注:条件 1 表示在线路 16 - 15 上距节点 16 为 10% 的地方安装一个 IPC120;条件 2 表示在线路 16 - 17 上距节点 16 为 20% 的地方安装一个 IPC120;条件 3 表示在线路 17 - 27 上距节点 17 为 10% 的地方安装一个 IPC120;条件 4 表示在线路 16 - 15 上距节点 16 为 10% 的地方安装一个 IPC120,同时在线路 17 - 27 上距节点 17 为 10% 的地方安装另一个 IPC120;条件 5 表示在线路 16 - 17 上距节点 16 为 20% 的地方安装一个 IPC120,同时在线路 17 - 27 上距节点 17 为 10% 的地方安装另一个 IPC120;

4.2 控制目标给定时的算例

表 2 给出了算例系统不同计算条件下的潮流收敛情况。表中的 P_L 和 Q_L 为 IPC 所在线路的潮流控制目标值, B_1 和 B_2 是求解出的电感电纳值和电容电纳值。

4.3 算例结果分析

由表 1、2 可见,无论是潮流控制器参数给定,还是控制目标给定,方法 B 由于对常规节点附加注入法 A 的附加注入项进行了修正,使得 B 的收敛性比

A 的收敛性有比较明显的改善。方法 C 通过对方法 A 进行斯梯芬或埃特金²加速处理,效果也比较明显。就方法 B 和 C 的总体效果比较而言,前者略好于后者。对常规方法 A 同时进行附加注入项的修正和斯梯芬(或埃特金²)加速处理后的方法 D,其综合处理效果介于 B 和 C 之间,因此,通常也就没有必要对方法 B 或 C 再进行处理使其变成方法 D。

总之,本文所提出的两种改进方法 B 和 C 均取

表 2 新英格兰 39 节点系统(单位:标么值)

Tab. 2 New England 39-bus system (pu)

条件	B_1	B_2	P_L	Q_L	收敛次数			
					A	B	C	D
1	- 1.142 32	1.978 27	2.70	- 0.40	74	35	48	36
2	- 1.447 66	1.601 19	2.80	- 0.19	66	29	30	25
3	- 0.402 72	0.502 57	0.85	- 0.13	46	28	25	20
3	- 1.170 00	1.953 44	2.70	- 0.40	84	37	59	49
	- 0.395 55	0.499 30	0.85	- 0.13				
4	- 1.422 13	1.641 98	2.80	- 0.19	73	35	39	40
	- 0.392 51	0.489 75	0.85	- 0.13				

注:计算条件同表 1

得了比较满意的效果,它为提高含潮流控制器的潮流计算效率提供了较好的途径。

5 结论

1) 基于对常规节点附加注入法和常规牛顿法的剖析比较,找到了常规节点附加注入法收敛性存在问题的主要原因在于等效节点附加注入项处理的不够全面,需要进行补充完善,方可有助于改善其收敛性。

2) 提出了通过附加注入功率项的修正进行改进的节点附加注入 PQ 分解法,取得了改善收敛性和提高计算效率的双重效果。

3) 提出了通过斯梯芬或埃特金²加速处理进行改进的节点附加注入 PQ 分解法,取得了改善收敛性和提高计算效率的双重效果。

4) 上述两种改进方法效果相当,它们为提高含潮流控制器的潮流计算效率提供了较好的解决途径。

参考文献:

- [1] Fang W L, Ngan H W. Extension of Newton Raphson Load Flow Techniques to Cover Multi Unified Power Flow Controllers[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. Hong Kong: 1997. 383-388.
- [2] Fuerte-Esquivel C E, Acha E. A Newton-type Algorithm for the Control of Power Flow in Electrical Power Networks[J].

IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1474-1480.

- [3] 段献忠,陈金富,李晓路,等(DUAN Xianzhong, CHEN Jinfu, LI Xiao-lu, et al). 柔性交流输电系统的潮流计算(Power Flow Calculation of Flexible AC Transmission Systems)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1998, 18(3): 195-199.
- [4] 于继来,柳焯(YU Ji-lai, LIU Zhuo). 基于移相器统一特性的潮流控制(Power Flow Control Based on the Common Characteristic of Phase Shifters)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1994, 14(6): 1-5.
- [5] 于继来,柳焯(YU Ji-lai, LIU Zhuo). 电力系统潮流解算中广义潮流控制器(GPFC)的统一分析(Unified Analysis of Generalized Power Flow Controller(GPFC) in Power System Load Flow Calculation)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1994, 18(12): 12-18.
- [6] 储钟武,何轶良,崔明根,等(CHU Zhongwu, HE Yiliang, CUI Minggen, et al). 数值分析(Numerical Analysis)[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社(Harbin: Heilongjiang Science & Technology Press), 1987. 232-233.
- [7] Pai M A. Energy Function Analysis for Power System Stability[M]. Kluwer Academic Publishers, 1989.

收稿日期: 2004-04-26; 修回日期: 2004-07-04

作者简介:

易善军(1975-),男,博士研究生,从事电力系统潮流控制与 FACTS 方面的研究; E-mail: hitysj@163.com

郭志忠(1961-),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统分析与控制、电力系统信息安全的研究。

Power flow solution by improved node additional injection method with power flow controllers

YI Sharr-jun, GUO Zhi-zhong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: By comparing traditional node additional injection method with the Newton Raphson method, this paper concludes that the main problem of the convergence of the injection method is caused by incompletely dealing with the equivalent additional injection items. On this basis, this paper proposes an improved node additional injection method, which improves the convergence of power flow iteration by introducing new correction items into the node power imbalance items of the power flow equation. In addition, the Aitkens²-process is used to accelerate the convergence of power flow based on the linear convergence characteristics of the traditional node additional injection PQ method. Thus, the convergence and efficiency of the algorithm are also further enhanced. The simulation results indicate that the two improved algorithms are better than the traditional ones.

Key words: electric power system; power flow; node additional injection method; power flow controller; acceleration