

一种负荷特性对电压稳定影响的分析方法

徐志友, 纪延超, 钮文艳
(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在简单系统中, 分析了将感性负荷的一部分等效为对地支路后对系统功率特性与负荷特性曲线相切点的影响。在多节点系统中应用块圆盘定理证明了将负荷等效为接地导纳支路后对潮流收敛性的影响。并应用矩阵特征值扰动定理和圆盘定理证明了只从节点的等效自阻抗的变化趋势并不能判明系统联系强弱的变化趋势。

关键词: (块)圆盘定理; (反)对称阵; 最小奇异值; 负荷特性曲线

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)08-0024-06

0 引言

20世纪70年代以来,许多国家的电力系统发生了电压崩溃事故^[1~3]。电压稳定已成为系统正常运行必须考虑的一个重要因素。虽然电压稳定问题本质上是动态问题,然而就大多数电压稳定破坏事故而言,在事故的初期可认为是静态问题,并且可使计算简化。常规潮流程序是分析静态电压稳定性的基础,求取裕度必须先求出临界点,而常规潮流程序在临界点处发散,为此派生出了各种方法,如最优化法^[4],内点法^[5],延拓法^[6],潮流多解法^[7],连续潮流法^[8],改进连续潮流法^[9],平衡解流形追踪法^[10]。文献[11]将重负荷感性无功转化为节点对地感纳支路,文献[12]将所有负荷的功率转化为对地导纳支路并入网络中,文献[13]讨论了负荷特性与电压稳定性的关系。

本文在文献[11~13]的基础上,应用块圆盘定理^[14]和实矩阵特征值性质证明了文献[11]和[12]的结论,并应用对称阵特征值扰动定理^[15]和圆盘定理^[15]分别就节点增加对地支路和双回路开断一回为例证明了只从节点的等效自阻抗的变化趋势并不能判断系统联系强弱的变化趋势。

另外,对于简单系统,本文首先分析了型电路的极限负荷点,即 $P_{R0} - V_R$ 曲线的“鼻点”,对应于无并联接地支路的电路所对应的 $P_{R0} - V_R$ 曲线与并联接地支路所对应的 $P_Y - V_R$ 曲线的切点,解释了将负荷功率转化为接地支路改善雅可比矩阵收敛性的原因,其次,证明了在临界状态下2潮流解是重合的。

1 2节点系统临界状态的若干性质

1.1 在 $P_{R0} - V_R$ 曲线临界点处收敛性的改进

为克服潮流在临界点处的奇异性,方法之一就

是用 ZIP 负荷代替感性恒功率负荷。现用图 1 说明,设电源电压 $|E_S| \neq 0$, Z 表示线路阻抗,负荷侧恒功率 $P_{R0} + jQ_{R0}$ 由 3 部分组成,其中: Y 表示对地导纳, I_L 表示电流源,且其恒功率负荷 $P_R + jQ_R$ 的功率因数可变。图 2 表示其等效电路,其中对地导纳 Y 和电流源 I_L 均计入网路中。



图 1 准型电路

Fig 1 Quasi-type circuit



图 2 等效电路

Fig 2 Equivalent circuit of sub-type circuit

由图 1, 得有功功率 $P_{R0} = P_Y + P_{I_L} + P_R$, 求导得

$$\frac{dP_{R0}}{d|V_R|} = \frac{dP_Y}{d|V_R|} + \frac{dP_{I_L}}{d|V_R|} + \frac{dP_R}{d|V_R|} \quad (1)$$

由于 $P_Y = f(V_R)$ 是一凹函数, 而 $P_{I_L} = g(V_R)$ 表示一直线, 故 $P_{I_L} + P_Y$ 仍是一凹函数, 为简化起见, 令电流源 $I_L = 0$, 即设 $P_{R0} = kP_0 (P + P|V_R|^2)$, $Q_{R0} = kQ_0 (Q + Q|V_R|^2)$, 且 $P + P = Q + Q = 1$, P_0, Q_0 是正常运行时的负荷功率, k 是负荷因子, $P^{(Q)}, P^{(Q)}$ 表示负荷成分所占比例。图 3 中, 曲线 1 表示负荷侧网络特性曲线, 即 $P_{R0} - V_R$ 曲线, 曲线 2 表示负荷对地支路特性曲线, 即 $P_Y - V_R$ 曲线。

令 $0 < P, Q < 1$, 若 $P = C_1, Q = C_2$, 则当 k 不断增大时, 曲线 2 连续右移, 直至曲线 2 与曲线 1 的

下半支相切,如图 3 所示。当曲线 1 与曲线 2 相切时,即 $\frac{dP_{R0}}{d|V_R|} = \frac{dP_Y}{d|V_R|}$ 时,由式 (1) 得 $\frac{dP_R}{d|V_R|} = 0$, 这正对应图 2 的临界状态。此时相切点 C, 正是负荷中恒功率部分的特性曲线, 即 $P_R - V_R$ 曲线的鼻点, 如图 4 所示。这样, 就将求图 1 的临界状态转化为求图 2 的临界状态, 从求 $P_{R0} - V_R$ 曲线的鼻点 O 转化为求 $P_R - V_R$ 曲线的鼻点 C。由图 3 看到, C 点位于原点与 O 点之间, 由于临界点由 O 点下移至 C 点, 所以在 O 点潮流的收敛性得以改善。

在临界状态下, 其恒功率负荷部分功率达到最大值, 其恒阻抗负荷部分功率达到最小值, 电压达到最低值。

图 1 中, $|E_s| = 1 \text{ p.u.}$, $Z = j0.25 \text{ p.u.}$, $Y = 1.4 \text{ p.u.}$, $l = 0$ 。

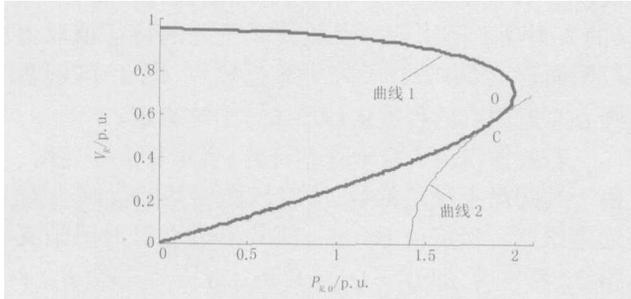


图 3 $P_{R0} - V_R$ 曲线与 $P_Y - V_R$ 曲线在相切状态下的对应关系

Fig 3 $P_{R0} - V_R$ curve and load characteristic curve $P_Y - V_R$ at the tangent state

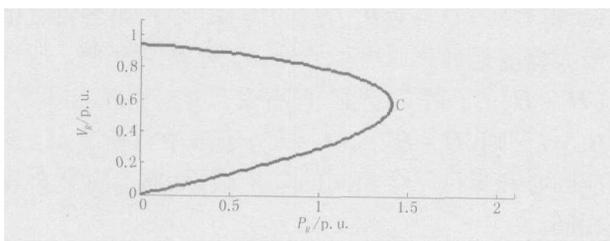


图 4 在相切状态下的 $P_R - V_R$ 曲线

Fig 4 $P_R - V_R$ curve at the tangent state

在曲线 1 与曲线 2 相切的工况下, p 与 q 越小, 切点 C 越下移。反之, p 与 q 增大时, 即负荷因子 k 增大时, 切点 C 上移, 当 $p = q = 1$ 时, k 增至最大值, 曲线 1 和 2 重合, C 点与 O 点重合。总之, $P_{R0} - V_R$ 曲线与 $P_Y - V_R$ 曲线的相切点就是 $P_R - V_R$ 曲线的最大功率点。

恒功率负荷是否转化为恒阻抗 (恒电流) 负荷对 $P_{R0} - V_R$ 曲线鼻点的确定并无影响, 因为 $P_{R0} -$

V_R 曲线反映的是网络特性, 但这种转化的程度对 $P_R - V_R$ 曲线和临界点有影响。

准型电路感性接地支路的作用: 从物理角度讲, 扩大了可运行区域; 从数学角度讲, 就是从求 $P_{R0} - V_R$ 曲线的鼻点转化为求 $P_R - V_R$ 曲线的鼻点。临界点越过 $P_{R0} - V_R$ 曲线鼻点的程度取决于转化为恒阻抗负荷的比例, 比例越高, 临界点离原点越近, 临界阻抗就越小。比例由 0 增加到 1 的过程就是临界点由 O 点下移至原点的过程, 就是 $P_R - V_R$ 曲线功率最大值连续减少的过程, 也是收敛性改进的过程。

对上述现象可用 L 指标^[16]解释, 当负荷功率的一部分用感性接地支路表示时, 则系统的等效阻抗将变小, 而剩余负荷功率的等效阻抗将变大, 因此 L 将变小, 若负荷功率全部用接地支路表示, 则系统的等效阻抗将更小, 而剩余负荷功率 (等于零) 的等效阻抗将趋于无穷大 (相当于开路), 因此 L 将趋于零, 其物理意义是: 若负荷功率全部用接地支路表示, 则不存在静态电压稳定性问题。

1.2 直角坐标下对应于临界状态时两潮流解的重合

图 2 中, 令 $E_{eq} = E$, $V_R = e + jf$, $Z_{eq} = r + jx$ 且 $x > r$, $(r + jx)(g - jb) = 1$, 则 $m = \frac{x}{r} = \frac{b}{g} > 1$, $mn = 1$ 。

$$S_R = (Ee - e^2 - f^2)(g + jb) - (b - jg)Ef \quad (2)$$

将式 (2) 实虚部分开, 得

$$\left(e - \frac{E}{2}\right)^2 + \left(f + \frac{mE}{2}\right)^2 = \left(\frac{E}{2}\right)^2 + \left(\frac{mE}{2}\right)^2 - \frac{P}{g}$$

$$\left(e - \frac{E}{2}\right)^2 + \left(f - \frac{nE}{2}\right)^2 = \left(\frac{E}{2}\right)^2 + \left(\frac{nE}{2}\right)^2 - \frac{Q}{b} \quad (3)$$

两圆圆心分别为: $O_P \left(\frac{E}{2}, -\frac{mE}{2}\right)$, $O_Q \left(\frac{E}{2}, \frac{nE}{2}\right)$,

圆心距离: $D = (m + n)\frac{E}{2} = Con$, 半径分别为:

$$R_P = \sqrt{\left(\frac{E}{2}\right)^2 + \left(\frac{mE}{2}\right)^2 - \frac{P}{g}}$$

$$R_Q = \sqrt{\left(\frac{E}{2}\right)^2 + \left(\frac{nE}{2}\right)^2 - \frac{Q}{b}}$$

在临界工况下, $D = R_P + R_Q$, 现给出证明:

$$J = \begin{bmatrix} g(E - 2e) & -2gf - b\bar{f} \\ b(E - 2e) & -2bf + g\bar{E} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $\det J = 0$, 得 $E = 2e_{cr}$, 这与 $|V_S| = 2|A||V_{Rcr}| \cdot \cos^{[1]}$ 是一致的, 因为 $|V_R| \cos \delta = e_{cr}$ 而 $V_{Rcr} =$

$|V_{R\ cr}| = e_{cr} + jf$, 由 $-\frac{1}{4} < 0$, 得 $f > 0$ 且 $|e| > |f|$ 。

$$R_p = \sqrt{\left(\frac{E}{2}\right)^2 + \left(\frac{mE}{2}\right)^2} - \frac{P}{g} = m\frac{E}{2} + f \quad (5)$$

$$R_Q = \sqrt{\left(\frac{E}{2}\right)^2 + \left(\frac{mE}{2}\right)^2} - \frac{Q}{b} = n\frac{E}{2} - f \quad (6)$$

$R_p + R_Q = (m+n)\frac{E}{2}$, 即两潮流解重合。

2 潮流收敛性分析

常规潮流雅可比矩阵 $J = \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix}$, 因为雅可比矩阵是非对称实矩阵, 故可能存在共轭复特征值对。

4个主子矩阵的对角元素为

$$\begin{cases} H_{ii} = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin_{ij} - B_{ij} \cos_{ij}) \\ N_{ii} = -2V_i^2 G_{ii} - V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos_{ij} + B_{ij} \sin_{ij}) \\ K_{ii} = -V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos_{ij} + B_{ij} \sin_{ij}) \\ L_{ij} = 2V_i^2 B_{ii} - V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin_{ij} - B_{ij} \cos_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_i 和 V_j 表示节点 i 和 j 的电压幅值, $_{ij}$ 表示节点 i 和 j 的电压相位差, G_{ij} 和 B_{ij} 表示节点 i 和 j 的互电导和互电纳, G_{ii} 和 B_{ii} 表示节点 i 的自电导和自电纳。可以看出, H_{ii} 、 K_{ii} 与接地支路无关。 B_{ii} 只影响 L_{ii} , G_{ii} 只影响 N_{ii} 。

4个主子矩阵的对角元素为

$$\begin{cases} H_{ij} = -V_i V_j (G_{ij} \sin_{ij} - B_{ij} \cos_{ij}) \\ N_{ij} = -K_{ij} \\ K_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos_{ij} + B_{ij} \sin_{ij}) \\ L_{ij} = H_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

做如下变换:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} = J_a + J_b = \begin{bmatrix} \frac{H+H^T}{2} & N \\ K & \frac{L+L^T}{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{H-H^T}{2} & 0 \\ 0 & \frac{L-L^T}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$(H+H^T)$ 子阵和 $(L+L^T)$ 子阵是实对称阵, 其特征值在实轴上, $(H-H^T)$ 子阵和 $(L-L^T)$ 子阵是实反对称阵, 其特征值在虚轴上。因为 J_a 阵和 J_b 阵的对角子矩阵都属于正规矩阵, 所以满足块圆盘定理。

设节点 i 是弱节点, 这里的弱节点是指与发电机节点电气联系较弱且相对于自身极限承受能力而言负荷较大的节点。为方便起见, 假定系统中已无 PV 节点。

先讨论 J_a 阵, 就 J_a 阵对应的圆盘圆心而言, 就是讨论 $(H+H^T)$ 阵和 $(L+L^T)$ 阵的特征值范围。

当 $i=j$ 时,

$$H_{ii} = V_i^2 B_{ii} + Q_i \quad L_{ii}^{(0)} = V_i^2 B_{ii} - Q_i \quad (10)$$

这里 $V_i^2 B_{ii}$ 起主导作用, Q_i 起次要作用, 所以 H_{ii} 和 $L_{ii}^{(0)}$ 同号, 即 $(H+H^T)$ 子阵和 $(L+L^T)$ 子阵对应的对角元素同号。对负荷节点而言, $Q_i < 0$, 又 $B_{ii} < 0$, 则 Q_i 与 $V_i^2 B_{ii}$ 同为负号, 而 H_{ii} 和 $L_{ii}^{(0)}$ 均为负数, $|H_{ii}| - |L_{ii}^{(0)}| = -2Q_i > 0$, 得 $|H_{ii}| > |L_{ii}^{(0)}|$ 且 $(|H_{ii}| - |L_{ii}^{(0)}|)$ 随负荷的增大而增加, 另由 $H_{ij} = L_{ij}$ 及 $(H+H^T)$ 子阵和 $(L+L^T)$ 子阵维数相同知, 节点 i 的 2 圆盘半径相等。因此就 2 子阵的特征值取值范围而言, $(L+L^T)$ 子阵更靠近原点, 即 J_a 阵圆盘圆心靠近原点的程度由 $(L+L^T)$ 子阵决定。

若要使 $(L+L^T)$ 子阵非奇异, 当运行点一定时, 由于其圆盘半径是常数, 所以只能使其圆盘圆心 L_{ii} 远离原点。当负荷 Q_i 的一部分由节点对地感纳支路 B_{p0} 等效后, 即 $Q_i = Q_{i0} + V_i^2 B_{p0}$, 得 $L_{ii}^{(1)} = V_i^2 (B_{p0} + B_{ii}) - Q_{i0}$, $|L_{ii}^{(1)}| > |L_{ii}^{(0)}|$ 。对 $(L+L^T)$ 子阵而言, 由于 $\sum L_{ii} = \sum_{ij} L_{ij}$ 且各特征值同号, 根据特征值扰动定理^[15], 当 L_{ii} 远离原点时, 各特征值也不同程度的远离原点, 所以有利于收敛。若负荷 $Q_i = B_{p0} \cdot V_i^2$, 得 $L_{ii}^{(1)} = Q_i + V_i^2 B_{ii}$, $|L_{ii}^{(1)}| = |L_{ii}^{(max)}|$, 则各特征值最大程度地远离原点。另外, B_{p0} 对 H_{ii} 无影响, 所以 $(H+H^T)$ 子阵的特征值不受影响。由 $H_{ii} = L_{ii}^{(1)}$, $H_{ij} = L_{ij}$, 则 $(H+H^T)$ 、 $(L+L^T)$ 子阵中负荷节点 i 对应圆心和半径完全相同的 2 个圆, 从而非奇异程度相同。

以上所述也表明: 负荷节点无功转化越多, 潮流收敛性越好; 越多负荷节点参与无功转化, 潮流收敛性越好, 证明了文献 [11] 的结论。同时也说明, 在潮流接近临界点处 $P-Q$ 分解法对感纳负荷仍适用。

根据块圆盘定理, J_a 阵的圆盘半径就是 N 子阵和 K 子阵的范数。由式 (7) 知: G_{ii} 只影响 N 子阵 $N_{ii}^{(0)}$ 1 个对角元素。

$$N_{ii}^{(0)} = -V_i^2 G_{ii} - P_i \quad K_{ii} = V_i^2 G_{ii} - P_i \quad (11)$$

对应地, 这里 $-P_i$ 起主要作用, $V_i^2 G_{ii}$ 起次要作用, 所以 $N_{ii}^{(0)}$ 和 K_{ii} 同号。对负荷节点 i 而言, $P_i < 0$, 又 $G_{ii} > 0$, 即 P_i 与 $V_i^2 G_{ii}$ 异号, 因为 $K_{ii} > 0$ 且 $N_{ii}^{(0)} >$

0, 得 $K_{ii} - N_{ii}^{(0)} = 2V_i^2 G_{ii} = 0$ 。由于 $|K_{ij}| = |N_{ij}|$ 及 K 子阵和 N 子阵维数相同, 因此就 J_a 阵的圆盘半径而言, N 子阵节点 i 所对应的半径较小。

负荷电导对改善潮流收敛性也有一定影响。当负荷 P_i 的一部分由节点对地电导支路 G_{p0} 等效后, 即 $P_i = P_{i0} - V_i^2 G_{p0}$, 得 $N_{ii}^{(1)} = -V_i^2 (G_{p0} + G_{ii}) - P_{i0}$, $|N_{ii}^{(1)}| > |N_{ii}^{(0)}|$ 。将负荷 $P_i = -G_{p0} V_i^2$ 代入 N_{ii} 后得 $N_{ii}^{(1)} = -V_i^2 G_{ii} + P_i$, 即 $K_{ii} = -N_{ii}^{(1)}$, 而 G_{p0} 对 K_{ii} 无影响, 又 K, N 子阵中 $N_{ij} = -K_{ij}$ 且 $N_{ii}^{(1)} = N_{ii}^{(\max)} = -K_{ii}$, 即节点 i 对应圆心和半径完全相同的 2 个圆, 使 J_a 阵的特征值取值半径变大, 但效果有限, 因为 $N_{ii}^{(1)} - N_{ii}^{(0)} = 2V_i^2 G_{ii} = 0$, 且 $N_{ii}^{(1)} - N_{ii}^{(0)}$ 随负荷的增加而减少。负荷电导的作用: 从物理角度讲, 有利于潮流收敛; 从数学角度讲, 由于 $K_{ii} = -N_{ii}^{(1)}$, 使 J_a 阵的不对称性增强, 使 J_a 阵特征值的虚部有增大的趋势, 从而使 J_a 阵最小模特征值远离原点, 改善了潮流收敛性。

以上分析表明: 弱节点采用导纳负荷对潮流收敛性有利, 从而证明了文献 [12] 的结论。

总之, 若负荷节点功率用接地支路等效, 即 $P_i = -G_{p0} V_i^2$, $Q_i = B_{p0} V_i^2$, 则 $L_{ii}^{(1)} = H_{ii}$, $N_{ii}^{(1)} = -K_{ii}$, 且 $L_{ii}^{(1)} < L_{ii}^{(0)} < 0$, $|N_{ii}^{(1)}| > |N_{ii}^{(0)}|$ 和 $N_{ii}^{(1)} < 0$ 。

对于 J_b 阵, 当 $i = j$ 时,

$$\begin{aligned} H_{ii} - H_{ii}^T &= 0 \\ L_{ii} - L_{ii}^T &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

当 $i \neq j$ 时,

$$\begin{aligned} H_{ij} - H_{ji} &= -2V_i V_j G_{ij} \sin \delta_{ij} \\ L_{ij} - L_{ji} &= -2V_i V_j G_{ij} \sin \delta_{ij} \end{aligned} \quad (13)$$

上述关系与节点 i 功率是否转化为对地支路无关, 因此不予考虑。正常运行时 $G_{ij} \sin \delta_{ij} \cong 0$, 即 J_b 阵几乎是零阵。

3 系统联络性与节点自电抗和节点间互电抗的关系

3.1 系统联络性与节点自电抗的关系

导纳阵 Y 可为弱或强对角占优矩阵, 即使 B 阵为弱对角占优矩阵, 也不会存在零特征值, 否则其逆阵不存在, 而事实上任意节点间均存在电气联系。

导纳阵 $Y = G - jB$ 是一复对称阵, 即 G, B 都是实对称阵。当只有某一对角元素 y_{ii} 改变 y_{ii} 后, 只有此圆盘圆心也改变 y_{ii} , 但其半径不变, 且其他圆盘未有任何改变。由于 Y 阵以 B 阵为主, 故本文讨论以 B 阵展开, G 阵的讨论与此完全相同。

感纳阵 B 为一对角占优矩阵, 且主对角元素为

正数, 则其所有特征值均位于右半平面, 又由于是对称阵, 故特征值在右半轴上。记变化前、后的感纳阵为 B_0, B_1 , 即 $B_1 = B_0 + B$, 若节点 i 增加一对地感性支路, 即感纳阵的某一对角元素由 b_{ii} ($b_{ii} > 0$) 变为 $b_{ii} + b_0$ ($b_0 > 0$), $B = \text{diag}\{0, \dots, b_0, \dots, 0\}$ 。记 B_0 阵、 B_1 阵的任一特征值为 (B_0) 、 (B_1) , B 阵的最大、最小特征值分别为 $\max(B) > 0$, $\min(B) = 0$, 由 $\sum b_{ii} = \sum i$, $(B_0) + \min(B)$ (B_1) $(B_0) + \max(B)$ [15] 知, B_1 阵的所有特征值均做程度不同的同向运动, 且圆心为 b_{ii} 的圆盘的特征值 i 增幅最大, 因为当 b_{ii} 时, 由于其半径为常数, 相比之下可视为无穷小, 从而圆心为 b_{ii} 的圆盘变成孤立圆, 只能含有一个实特征值且趋于无穷大。其它圆盘是不变的, 故其它特征值不能逸出其圆盘所组成的连通区域, 即变化是有限的。

由 $\det B = \prod_i (B)$, 得 $\det B_1 > \det B_0 > 0$, 又 $x_{ii} = \frac{\text{adj}(B_{ii})}{\det(B)}$, 而 $\text{adj}(B_{ii})$ 不变, 所以 x_{ii} 变小。或应用圆盘定理, 因为特征值 i 增幅最大, 所以 i^{-1} 降幅也最大, 因为 B 阵是良态阵, 则包围 i^{-1} 的圆盘圆心变化幅度最大, 即 x_{ii} 变小, i 节点对系统等效电抗变小, 系统联系加强, 但这与实际不相符, 根本原因在于 i 节点处的等效电势也变小, 由此看出: 仅以节点自阻抗值的变化是不能得出系统联系强弱变化趋势的。同理, 对节点接地电容的分析也与其实际作用相反。

3.2 系统联络性与节点间互电抗的关系

若开断双回线中的 1 回, 不失一般性, 假定线路两端节点编号为 1、2, 则

$$B = \begin{bmatrix} b_0 & -b_0 & \dots \\ -b_0 & b_0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (b_0 < 0), \text{其他元素均}$$

等于 0, 则圆盘 1 和 2 是 2 个完全相同的圆, 其特征值 b 变化范围为 $[2b_0, 0]$, 导纳阵的各特征值将不同程度地减小, 即从正半轴趋向原点, 特别是节点 1、2 对应的特征值 b_1, b_2 变化最大, 因为其圆心位置变化最大。设 b_0 是连续减小的, 则包含 b_1, b_2 的 2 圆盘在左移的过程中圆域连续缩小, 使其特征值趋向圆盘圆心, 即特征值左移。相应地, b_1^{-1}, b_2^{-1} 增幅最大, 从而包含 b_1^{-1}, b_2^{-1} 的圆盘圆心离开原点右移的幅度也最大, 即 x_{11}, x_{22} 增大, 即节点间联系减弱, 这符合实际情况。

4 仿真结果与分析

采用 2 个雅可比矩阵, 1 个是常规潮流雅可比矩阵 J , 另一个是降阶雅可比矩阵 J_2 ^[13]。

$$J_1 = J \tag{14}$$

$$J_2 = L - KH^{-1}N \tag{15}$$

本文采用最小奇异值作为判断潮流收敛性好坏的指标^[16]。

数据均是在下列 2 个标准试验系统上得到的, 设定的系统状态如下:

IEEE - 14 系统, 由节点 9 ~ 14 组成 1 个广义节点, 负荷因子 $k = 1.5$,

IEEE - 30 系统, 由节点 26 和 30 组成 1 个广义节点, 负荷因子 $k = 1.63$ 。

表 1 IEEE-14 系统中电导比例增加时的 MSV s

Tab 1 MSV s with increasing proportions of conductance load in the IEEE-14 system

负荷类型	75% P	50% P	25% P	100% g
	25% g	50% g	75% g	
	100% Q	100% Q	100% Q	100% Q
min(J ₁)	0.373 8	0.413 0	0.453 6	0.494 6
min(J ₂)	0.464 5	0.496 4	0.528 4	0.560 3

从表 1 可以看出, 电导负荷比例越高, 潮流收敛越好。

表 2 IEEE-14 系统中感纳比例增加时的 MSV s

Tab 2 MSV s with increasing proportions of inductive susceptance load in the IEEE-14 system

负荷类型	100% P	100% P	100% P	100% P
	100% Q	25% b	50% b	75% b
		75% Q	50% Q	25% Q
min(J ₁)	0.336 1	0.351 9	0.366 3	0.379 3
min(J ₂)	0.432 5	0.462 3	0.491 8	0.521 2

表 2 表明感纳负荷比例越高, 潮流收敛越好。

表 3 IEEE-30 系统中导纳比例增加时的 MSV s

Tab 3 MSV s with increasing proportions of admittance load in the IEEE-30 system

负荷类型	100% (P + Q)	75% (P + Q)	50% (P + Q)	25% (P + Q)
		25% (g + jb)	50% (g + jb)	75% (g + jb)
min(J ₁)	0.231 4	0.233 5	0.235 0	0.236 2
min(J ₂)	0.491 9	0.509 4	0.526 3	0.542 6

表 3 表明导纳负荷比例越高, 潮流收敛越好, 这与简单系统中完全一致。

表 4 IEEE-14 系统中对应于 4 种负荷模型的 MSV s

Tab 4 MSV s for 4 types of load model in the IEEE-14 system

负荷类型	(P, Q)	(P, b)	(g, Q)	(g, b)
min(J ₁)	0.336 1	0.390 8	0.494 6	0.532 0
min(J ₂)	0.432 5	0.550 3	0.560 3	0.676 9

表 5 IEEE-30 系统中对应于 4 种负荷模型的 MSV s

Tab 5 MSV s for 4 types of load model in the IEEE-30 system

负荷类型	(P, Q)	(P, b)	(g, Q)	(g, b)
min(J ₁)	0.231 4	0.231 6	0.237 3	0.237 1
min(J ₂)	0.491 9	0.518 4	0.533 5	0.558 2

从表 4 ~ 表 5 得出收敛性排序, 如表 6 所示。

表 6 对应于 4 种负荷模型的收敛性排序

Tab 6 The order of convergence for 4 types of load model

矩阵	排序
J ₁	(P, Q) < (P, b) < (g, Q), (或 (g, b) < (g, b), (或 (g, Q))
J ₂	(P, Q) < (P, b) < (g, Q) < (g, b)

从表 6 可以看出 (P, Q) 组合的负荷对潮流收敛性最不利, (P, b) 组合的负荷次之, (g, Q) 和 (g, b) 这 2 类负荷对潮流收敛性都较强, 且对于 J₂ 阵, 这 4 类负荷的排序是固定的。

5 结论

在 2 节点系统中, 证明了将一部分负荷功率转化为对地导纳支路后使临界点沿 $P_{R0} - V_R$ 曲线下移, 并证明了在临界状态下潮流解的惟一性。

在多节点系统中, 以节点增加对地支路和双回路开断一回为例说明只从节点的等效自阻抗的变化趋势并不能判断系统联系强弱的变化趋势。并证明了将负荷功率的一部分或全部转化为对地导纳支路有利于潮流收敛性, IEEE14 和 IEEE30 系统算例说明了这一点。

参考文献:

- [1] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Voltage Stability and Control Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 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.
CHENG Hao-zhong, WU Hao. Power System Reactive Power and Voltage Stability [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] Taylor C W. 电力系统电压稳定性 (影印版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Taylor C W. Voltage Stability of Power System, Process Plate [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [4] Parker C J, Morrison I F, Sutanto D. Application of an Optimization Method for Determining the Reactive Margin from Voltage Collapse in Reactive Power Planning [J].

- IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (3): 1473-1481.
- [5] Irisarri G D, Wang X R. Maximum Load Ability of Power Systems Using Interior Point Non-linear Optimization Methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1): 162-172
- [6] 周双喜,冯治鸿,杨宁. 大型电力系统 PV 曲线的求取[J]. 电网技术, 1996, 20(8): 4-8
ZHOU Shuang-xi, FENG Zhi-hong, YANG Ning Seeking PV Curves of Bulk Power System[J]. Power System Technology, 1996, 20(8): 4-8
- [7] 杨宁,冯治鸿,周双喜. 大电力系统中潮流多解的求取及其应用研究[J]. 电网技术, 1996, 20(5): 19-21, 30
YANG Ning, FENG Zhi-hong, ZHOU Shuang-xi Seeking and Application of a Pair of Multiple Load Flow Solution[J]. Power System Technology, 1996, 20(5): 19-21, 30
- [8] Chiang H D, Flueck A J, Shah K S, et al CPHLOW: a Practical Tool for Tracing Power System Steady State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634
- [9] 祝达康,程浩忠. 求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 37-40, 48
ZHU Da-kang, CHENG Hao-zhong An Improved Continuation Method in Tracing PV Curves of Power Systems[J]. Power System Technology, 1996, 20(8): 4-8
- [10] 彭志炜,胡国根,韩桢祥. 电力系统平衡解流形的追踪与电压失稳分叉点的搜索[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 173-177.
PENG Zhi-wei, HU Guo-gen, HAN Zhen-xiang Tracing of the Power System Equilibrium Solution Manifold and Searching for the Instability Bifurcation Point[J]. Proceedings of CSEE, 1998, 18(3): 173-177.
- [11] 张尧,宋文南,贺家李. 临近电压稳定极限的潮流和静稳极限算法[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(6): 17-23.
ZHANG Yao, SONG Wen-nan, HE Jia-li An Algorithm for the Load Flow Solution Close to the Voltage Stability Limit and the Determination of Static Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(6): 17-23.
- [12] Semlyen A, Gao B, Janischewskyj W. Calculation of the Extreme Loading Condition of a Power System for Assessment of Voltage Stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 1(6): 307-315.
- [13] Milosevic B, Begovic M. Voltage-stability Protection and Control Using a Wide-area Network of Phasor Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [14] Feingold D G, Varga R S Block Diagonally Dominant Matrices and Generalization of the Gerschgorin Circle Theorem[J]. Pacific Math, 1962, 12: 1241-1250.
- [15] Golub G H, VanLoan C F 矩阵计算 [M]. 袁亚湘,译. 北京:科学出版社, 2004.
Golub G H, VanLoan C F Matrix Computations [M]. YUAN Ya-xiang, Trans Beijing: Science Press, 2004
- [16] 周双喜,姜勇,朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
ZHOU Shuang-xi, JIANG Yong, ZHU Ling-zhi Review on Steady State Voltage Stability Indices of Power Systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7.

收稿日期: 2005-08-18; 修回日期: 2005-12-24

作者简介:

徐志友(1965-),男,博士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性;E-mail: xuzhiyou@hit.edu.cn

纪延超(1962-),男,博士,博士生导师,现研究方向为 FACTS在电力系统中的应用。

A method for analysing the effect of load characteristics on steady-state voltage stability

XU Zhi-you, JI Yan-chao, NI Wen-yan

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In the two-node system, firstly, the effect on the tangent point of system characteristic curve and load characteristic curve when a part of inductive constant power load is transferred into grounded branch is discussed. Secondly, two solutions of load flow coincidence under the critical condition is verified. In the multi-node system, the effect on the convergence of power flow using block gerschgorin theorem when load power is transferred into equivalent admittance is analysed, and the fact that whether the system becomes weak or strong can not be only judged by the change of node equivalent self-impedance is verified using eigenvalue disturbing theorem.

Key words: (block) gerschgorin theorem; (anti-) symmetrical matrix; minimum singular value (MSV); load characteristic curve