

快速求解多机系统机电振荡模式的新算法

崔小磊, 赵书强, 闫健杰

(华北电力大学 电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 提出了一种快速求解多机系统机电振荡模式的新方法, 既能避免维数灾问题又能防止出现丢根现象。首先, 通过建立发电机的经典模型, 计算出多机系统的各振荡模式(特征根虚部)和振荡模态(特征向量); 再用等值阻尼系统表示发电机的励磁控制作用对机电振荡模式的影响, 推导出只用机组惯性常数 M 和阻尼系数 D 及相应的特征向量表示的机电模式的实部估算公式, 由此公式估算出相应的实部, 从而得到各振荡模式的特征根的初值; 根据 Heffron-Phillips 全系统的状态矩阵和已经估算出的特征根, 用反幂法快速求出系统状态矩阵的根, 即为此多机系统的全部机电模式特征根。最后, 用 ENGLAND 10 机系统算例证明了该方法的有效性。

关键词: 多机系统; 机电模式; 特征根; 反幂法

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)06-0036-04

0 引言

随着电力系统发展, 大容量机组在网中不断投运, 快速励磁普遍使用, 低频振荡已成为威胁电网安全的重要问题。对此, 人们进行了大量研究, 其中, 特征根研究被公认为是最有效的分析方法, 其又可分为全部特征根法和部分特征根法。求解全部特征根的传统方法是 QR 法(其中 Q 为正交阵, R 为上三角阵), 即根据线性化后的全系统状态方程, 由 QR 法求出其全部特征根和特征向量, 并据此分析系统的振荡情况。当系统规模较小时, QR 法具有非常好的收敛特性和数值稳定性; 但随着系统规模扩大, 当状态方程阶数超过 200 阶时, QR 法的收敛性和数值稳定性显著恶化, 从而出现维数灾问题, 限制了其在大型电力系统中应用^[1]。

为此, 人们提出了多种只求取部分特征值的方法。只求取 A 阵中一部分与分析目的密切相关的特征值, 从而达到降低阶数的目的。主要有 AESOPS 法^[2]、SMA 法^[3]、S 矩阵法^[4]、STEPS 法^[5]等。许多学者进一步发展了这些算法; 文献[6]和[7]分别提出了改进 AESOPS 和 Arnoldi-Chebyshev 法等。但必须指出, 以上这些只求取部分特征值的方法大都存在一个共同问题, 即难以保证所有具有负阻尼或阻尼不足的机电振荡模式不被遗漏。本文根据对以上算法的研究, 提出一种既能避免维数灾又能避免机电振荡模式被遗漏的快速求解方法, 此算法使电力系统低频振荡在线预警和控制成为可能, 并用 ENGLAND 10 机系统的算例进行了验证。

1 数学模型

1.1 经典模型

对于一个 n 机电力系统, 当发电机采用经典模型并考虑阻尼时, 其线性化后的运动方程为

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega, \quad M \Delta \dot{\omega} + D \Delta \omega = -\Delta P \quad (1)$$

式中 $\Delta \delta$ 为发电机转角偏差; $\Delta \omega$ 为发电机转速偏差; M 为机组惯性常数; D 为机组阻尼系数。

1.2 四阶 Heffron-Phillips 模型

对于一个 n 机电力系统在某一运行方式下, 各机组考虑有按电压偏差的自动励磁调节器(AER)装置时的系统图如图 1 所示。

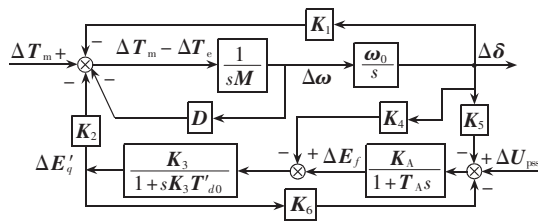


图 1 发电机 Heffron-Phillips 模型

Fig.1 Heffron-Phillips model of generator

发电机采用上述模型时, 全系统的微分状态方程如式(2)所示(各符号物理意义同文献[8], 下同)。该模型形式简单、物理概念清楚, 是电力系统低频振荡研究的最常用模型。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{M} K_1 & 0 & \frac{-1}{M} K_2 & 0 \\ \frac{-1}{T'_{d0}} K_4 & 0 & \frac{-1}{T'_{d0}} K_3 & \frac{1}{T'_{d0}} \\ \frac{K_u}{T_e} K_5 & 0 & \frac{K_u}{T_e} K_6 & \frac{1}{T_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{qe} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 算法实现

2.1 求解初值

2.1.1 求解初值虚部

一般而言,系统机电振荡模式的振荡模态主要取决于网络结构和系统参数,而受机组阻尼的影响较小。可以根据经典发电机模型(不考虑机组阻尼)求得系统的振荡模式及其特征向量。即发电机采用 E'_q 恒定时的模型,把负荷和网络方程经过坐标变换,并消去联络结点,最后形成全系统在小干扰下的微分振荡状态方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -D_E & 0 \\ -K_Z & 0 & I & -Z_m \\ 0 & 0 & Y_Q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta U_m \\ \Delta I_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

消去式(3)的代数方程,得到关于 $\Delta \delta$ 和 $\Delta \omega$ 的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ K' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $K' = -D_E [1 + Z_m Y_Q]^{-1} K_Z$, 可见 $\begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ K' & 0 \end{bmatrix}$ 是

关于状态变量 $\Delta \delta$ 和 $\Delta \omega$ 的系数矩阵,其特征根就是该多机系统机电模式的全部特征根;由于忽略了阻尼,因此只有虚部。用 QR 法可以同时求出相对应的特征向量。

2.1.2 求解初值实部

当发电机采用经典模型(1)时,取 $\omega_0 = 1$, $\Delta P = K_1 \Delta \delta$, 整理得:

$$A \dot{X} + B X = 0 \quad (5)$$

式中 $X = [\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \dots, \Delta \delta_n; \Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \dots, \Delta \omega_n]$; K_1 为系统同步转矩系数矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} D & M \\ M & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix}$$

式(5)中有 $2(n-1)$ 个复数特征值(模式)和特征向量(模态),且以共轭形式出现,它们可表示为

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}; \lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_{n-1}^*$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \lambda_1 U_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ \lambda_2 U_2 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} U_{n-1} \\ \lambda_{n-1} U_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_1^* \\ \lambda_1^* U_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2^* \\ \lambda_2^* U_2^* \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} U_{n-1}^* \\ \lambda_{n-1}^* U_{n-1}^* \end{bmatrix}$$

式中 $U_i = [V_{i1} \angle \theta_{i1}, V_{i2} \angle \theta_{i2}, \dots, V_{in} \angle \theta_{in}]$; $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$; V_{ij} 为特征向量第 j 个分量的模值, θ_{ij} 为特征向量第 j 个分量的相位。

由于 D 、 M 为对角阵, K_1 为一近似对称矩阵(如果不考虑网络电阻,则 K_1 为对称矩阵),故 A 为对称矩阵,而 B 为一近似对称矩阵。根据 A 和 B 的对称性可以证明,对应于不同特征值的特征向量关于 A 阵正交^[9],即

$$\begin{bmatrix} U_i \\ \lambda_i U_i \end{bmatrix}^T A \begin{bmatrix} U_j \\ \lambda_j U_j \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

当 $\lambda_j = \lambda_i^*$, $U_j = U_i^*$ 时,把 A 的表达式代入式(6)中,则有

$$\begin{bmatrix} U_i \\ \lambda_i U_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} D & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i^* \\ \lambda_i^* U_i^* \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$U_i D U_i^* + (\lambda_i + \lambda_i^*) U_i M U_i^* = 0 \quad (8)$$

设 $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$, $\lambda_i^* = \sigma_i - j\omega_i$; 由于 D 、 M 均为对角阵,则由式(8)可得特征根实部表达式为

$$\sigma_i = -\frac{D_{i1} V_{i2}^2 + D_{i2} V_{i2}^2 + \dots + D_{in} V_{in}^2}{2(M_{i1} V_{i1}^2) + M_{i2} V_{i2}^2 + \dots + M_{in} V_{in}^2} \quad (9)$$

由式(9)可知, M 为已知的机组惯性常数;只要求出阻尼系数和相应的特征向量就能直接估算出机电模式特征根的实部。特征向量可由式(4)得到,故求解阻尼系数是估算实部的关键。

发电机转子在振荡过程中,励磁绕组因切割定子旋转磁场而产生附加阻尼转矩,这种附加阻尼转矩除对振荡频率有一定影响外,主要影响振荡模式的阻尼。发电机因励磁控制作用产生的这种附加阻尼转矩可用等值阻尼系数表示。对接于无穷大母线的发电机,若采用上述四阶 Heffron - Phillips 模型,则发电机整步转矩系数可以表示为^[8]

$$\Delta T_e = \frac{K_2 K_4 (1 + T_e p) + K_2 K_5 K_u}{T_{d0}' T_e p^2 + (T_{d0}' + T_e / K_3) p + (1 / K_3 + K_6 K_u)} \Delta \delta$$

由于上式有复数算子 p , 所以整步转矩系数可分为 2 部分:一部分和 $\Delta \delta$ 同相,另一部分和 $j\Delta \delta$ 或 $\Delta \omega$ 同相,即

$$\Delta T_e = \Delta K_1 \Delta \delta + \Delta D_e j \delta \quad (10)$$

把 $\Delta D_e j \delta$ 称为附加阻尼转矩,其中, ΔD_e 为附加阻尼系数。对于稳态小振幅振荡,令 $p = j\omega$ 代入整步转矩系数表达式,可得等值阻尼系数为

$$\Delta D_e = \frac{(K_2 K_5 K_u + K_2 K_4) (T_{d0}' + T_e / K_3) - (1 / K_3 + K_6 K_u - T_{d0}' T_e \omega^2)^2 + \leftarrow \frac{K_2 K_4 T_e (1 / K_3 + K_6 K_u - T_{d0}' T_e \omega^2)}{(T_{d0}' + T_e / K_3)^2 \omega^2}}{(T_{d0}' + T_e / K_3)^2 \omega^2} \quad (11)$$

对多机系统,励磁系统间相互影响很小,可忽略不计;但发电机间机电模式的相互影响相对较大,必须考虑在内。所以式(11)衍化为式(12)。

$$\Delta D_e' = \frac{(K_2 K_5' K_u + K_2 K_4') (T_{d0}' + T_e / K_3) - (1 / K_3 + K_6 K_u - T_{d0}' T_e \omega^2)^2 + \leftarrow \frac{K_2 K_4 T_e (1 / K_3 + K_6 K_u - T_{d0}' T_e \omega^2)}{(T_{d0}' + T_e / K_3)^2 \omega^2}}{(T_{d0}' + T_e / K_3)^2 \omega^2} \quad (12)$$

$$K_{4ii}' = K_{4ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n K_{4ij} |V_j| / |V_i|$$

$$K_{5ii}' = K_{5ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n K_{5ij} |V_j| / |V_i|$$

式中 V_i 和 V_j 分别为发电机 i 和 j 的特征向量。

综上,阻尼系数为

$$D_{eqi} = D_i + \Delta D_{ei} \quad (13)$$

式中 D_i 为第 i 台发电机的固有机电阻尼。

2.2 求解多机系统状态矩阵

Heffron-Phillips 模型是电力系统低频振荡研究中应用最广泛的发电机线性化模型。本算法中发电机采用式(2)所示的 K_1 - K_6 模型。求解步骤为:先建立各元件(发电机、网络、负荷等)的方程,再经过适当坐标变换及接口,形成全系统的数学模型,然后对系统作线性化处理并利用代数方程消去代数变量,得到只含状态变量的线性微分方程组,并化为标准的状态方程形式。

由于 K_1 - K_6 模型不宜用于同步电机进相工况和调相工况下的动态稳定计算,文献[10]基于同步电机阻尼绕组对电力系统动态稳定性的重要影响,建立了考虑阻尼绕组作用的单机无穷大系统线性化 C_1 - C_{12} 模型,该模型直观地表示了包括交轴和直轴阻尼绕组在内的同步电机各部分之间的动态关系,为全面深入地分析同步电机的动态稳定问题提供了一种方便实用的数学模型。其建立过程是一样的,只是考虑了阻尼绕组的作用。

总之,这里可以根据研究的问题的重点不同,采用不同的数学模型,从而建立不同的状态矩阵,作为下面反幂法的初始矩阵。

2.3 反幂法求解机电模式特征根

反幂法主要用于已知矩阵近似特征值时,求矩阵的特征向量并提高特征值的精度。由此可见,正好适合于通过已知状态矩阵和特征根初始值求精确的特征值和相应的特征向量的问题。下面简单介绍反幂法的步骤(其中各符号含义同文献[11])。

设实方阵 A 的 n 个特征值为 $\lambda_i(i=1,2,\cdots,n)$, 所对应的特征向量为 $X_i=(x_1^{(i)},x_2^{(i)},\cdots,x_n^{(i)})(i=1,2,\cdots,n)$,且满足 $AX_i=\lambda_iX_i$ 。已知 A 的特征值 λ_m 的近似值 $\bar{\lambda}_m$ 时,有 $|\lambda_i-\bar{\lambda}_m|\gg|\lambda_m-\bar{\lambda}_m|\approx 0,i\neq m$;故对 $A-\bar{\lambda}_mI$ 应用反幂法时, $m_k\rightarrow 1/(\lambda_m-\bar{\lambda}_m),z_k\rightarrow \xi_m^0$;而收敛率为 $|\lambda_m-\bar{\lambda}_m|/|\lambda_j-\bar{\lambda}_m|\approx 0,|\lambda_j-\bar{\lambda}_m|=\min_{j\neq m}|\lambda_j-\bar{\lambda}_m|$ 。

这个比值一般很小,因此迭代收敛很快,往往只迭代两三次就可达到很高的精度。因此,反幂法是目前求特征向量最有效的方法。具体有 2 个步骤。

- a. 三角分解 $A-\bar{\lambda}_mI=LR$ 。
- b. 对 $k=1,2,\cdots$:当 $k=1$ 时,令 $u\leftarrow e=[1,1,\cdots,1]^T$;当 $k\neq 1$ 时,解 $Lu=z_{k-1}$;解 $Ry_k=u$;求 $m_k=\max(y_k)$;令 $z_k=y_k/m_k$;当 $m_k\approx m_{k-1}$ 或 $z_k\approx z_{k-1}$ 时停止计算,此时, $\xi_m^0\approx z_k,\lambda_m\approx \bar{\lambda}_m+1/m_k$,即为所求的特征向量和特征值。

由所求的特征向量可以求出相关因子,由特征值可以求出阻尼比和特征根的灵敏度,从而得到低频振荡的相关信息。

3 算例分析

为了验证本文方法,在 Matlab 环境中编写程序并针对 10 机 ENGLAND 系统进行了计算。计算中

发电机分别采用 E'_q 恒定模型和 K_1 - K_6 模型,负荷用恒定阻抗代替。网络参数取自电科院电力系统分析综合计算程序使用说明书,发电机及其励磁系统参数如表 1 所示,表 2 为不估算实部情况,表 3 为估算实部的情况。

由表 2 可见,初值不估算实部时,用反幂法求解机电模式特征根时,迭代次数都很多,最多的达到了 137 次,随着系统规模的扩大,迭代次数还会更多,这是由于反幂法是按模值的大小收敛的;估值和真值相差越大,要求解真值所需的次数也越多。并且第 6 个和第 7 个特征根为重根,即出现了丢根现象,这是因为 2 个根的给出的初值模相差很小,反幂法不能正确收敛到真值;随着系统规模的扩大,丢根的几率会更大。

由表 3 计算结果可见,快速估算所得的机电模式特征根与采用 QR 精确法所得的机电模式特征根比较接近。正由于给出的初估特征根比较接近真

表 1 发电机及其励磁系统参数

Tab.1 Parameters of generator and its exciting system

X_d	X_d'	X_q	M	T'_{d0}	K_e	T_e	D
0.295 0	0.069 7	0.287	60.6	6.56	10	0.95	5
0.249 5	0.053 1	0.237	71.6	5.70	10	0.95	5
0.262 0	0.043 6	0.258	57.2	5.69	10	0.95	5
0.670 0	0.132 0	0.620	52.0	5.40	10	0.95	5
0.254 0	0.050 0	0.241	69.6	7.30	10	0.95	5
0.295 0	0.049 0	0.292	52.8	5.66	10	0.95	5
0.290 0	0.057 0	0.280	48.8	6.70	10	0.95	5
0.210 0	0.057 0	0.205	69.0	4.79	10	0.95	5
0.020 0	0.006 0	0.019	1 000	9.00	0	0.95	100
0.100 0	0.031 0	0.069	84.0	10.20	10	0.95	5

表 2 不估算实部时的情况

Tab.2 The initial eigenvalues without real part

初值(无实部)	迭代次数	反幂法根
j3.2324	12	-0.1466+j3.1500
j5.0661	13	-0.1239+j5.0430
j5.3878	26	-0.2211+j5.3398
j6.2263	17	-0.1244+j6.2145
j6.0785	137	-0.1671+j6.0636
j7.4310	32	-0.1305+j7.4268
j7.4762	35	-0.1305+j7.4268
j7.8122	103	-0.2338+j7.8005
j7.6881	85	-0.2255+j7.6813

表 3 估算实部时的情况

Tab.3 The initial eigenvalues with real part

初值(有实部)	迭代次数	反幂法根
-0.3308+j3.2324	7	-0.1466+j3.1500
-0.2079+j5.0661	12	-0.1239+j5.0430
-0.2624+j5.3878	8	-0.2211+j5.3398
-0.1612+j6.2263	8	-0.1244+j6.2145
-0.2243+j6.0785	12	-0.1671+j6.0636
-0.1397+j7.4310	8	-0.1305+j7.4268
-0.2033+j7.4762	8	-0.1901+j7.4646
-0.2264+j7.8122	7	-0.2338+j7.8005
-0.2282+j7.6881	6	-0.2255+j7.6813

值,因此迭代次数比不估算实部时明显减少并且没有丢根。这说明了本文给出的快速方法的实用性,它可以精确计算所有的机电模式特征根,提高计算方法速度的同时,又避免了出现部分特征值固有的丢根现象。这为电力系统低频振荡的在线研究提供了合适的算法。

特别提出,在不丢根的前提下该方法计算速度很快。从理论上讲,*QR* 法求解特征根的计算量与矩阵阶数的三次方成正比,当发电机采用四阶 Heffron-Phillips 模型时,10 机系统状态矩阵的阶数为 40,而当发电机采用经典模型并忽略阻尼时,系统状态矩阵的阶数为 10,两者计算量之比为 64:1。用反幂法求精确值时,由于初估值比较接近,迭代的次数比较少,一般约为 8 次,计算机所用的时间很少。显然,系统规模越大,两者计算量相差就多。

4 结论

a. 采用本文快速算法能避免部分特征值法固有的丢根现象,并且计算速度比传统的 *QR* 精确法约快 10 倍,比较适合电力系统低频振荡的在线研究。

b. 由于本文待算的状态矩阵是独立的,要采用不同模型时只需改动相应的矩阵模块,其他部分不需变化,具有很强的通用性。

c. 采用本文快速估算方法所得的机电模式特征根与采用精确法所得的机电模式特征根比较接近,但计算量大为减少;能为其他一些算法提供初值。

参考文献:

[1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
[2] BERLY R T,BENNON R J,SHERMA D E. Eigenvalue analysis of synchronizing power flow oscillations in large electric power system[J]. IEEE Trans on PAS,1982,101(1):235-243.
[3] VERGESE G C, PEREZ-ARRIAGA I J,SCHWEPPE F C.

Selective modal analysis with application to electric power system[J]. IEEE Trans on PAS,1982,101(9):3126-3134.
[4] NAOYOKI U,TAIJI N. A new eigen-analysis method of steady-state stability studies for large power system:S matrix method[J]. IEEE Trans on PWRS,1988,3(2):706-713.
[5] SEMLYEN A,WANG Lei. Sequential computation of the complete eigensystem for the study zone in small signal stability analysis of large power system[J]. IEEE Trans on PWRS,1988,3(2):715-723.
[6] 於益军,薛禹胜. 大型电力系统机电模式特征根的直接初估和快速求解[J]. 电网技术,1996,20(2):21-23.
YU Yi-jun,XUE Yu-sheng. Direct estimation and faster calculation of swing mode eignvalues of large power systems[J]. Power System Technology,1996,20(2):21-23.
[7] 杜正春,刘伟,方万良,等. 大规模电力系统关键特征值计算的 Arnoldi - Chebyshev 方法[J]. 西安交通大学学报,2004,38(10):995-999.
DU Zheng-chun,LIU Wei,FANG Wan-liang,et al. Calculation of critical eigenvalues in large-scale power systems using Arnoldi - Chebyshev method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2004,38(10):995-999.
[8] 马大强. 电力系统机电暂态过程[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
[9] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
[10] 刘宪林,柳焯,娄和恭. 考虑阻尼绕组作用的单机无穷大系统线性化模型[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10):41-45.
LIU Xian-lin,LIU Zhuo,LOU He-gong. Linearized model of the one-machine infinite-bus considering the effect of damper windings[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(10):41-45.
[11] 刘萍. 数值计算方法[M]. 北京:人民邮电出版社,2002.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

崔小磊(1980-),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail:cxl823@tom.com);
赵书强(1964-),男,河北景县人,教授,博士,研究方向为电力系统稳定分析和控制、电力系统谐波分析;
闫健杰(1980-),男,山西静乐人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定分析与控制。

Electromechanical mode fast calculation of multi-machine power system

CUI Xiao-lei,ZHAO Shu-qiang,YAN Jian-jie

(North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: A fast calculation for the electromechanical mode of multi-machine power systems is presented,which avoids both dimensionality calamity and eigenvalue loss. The oscillatory mode(the imaginary part of eigenvalues) and the oscillatory mode shape(eigenvectors) are calculated with the classical model. The effect on the electromechanical mode of the excitation control is expressed by the additional equivalent damping coefficient. The formula of the real part including only inertia constants *M*,damping coefficients *D* and corresponding eigenvectors is derived to assume the real part of the eigenvalue,thus working out the initial eigenvalue. Then the inverse power method is used to calculate all accurate electromechanical eigenvalues rapidly according to the Heffron - Phillips state matrix of the whole system. The ENGLAND 10-machine system is employed to demonstrate the effectiveness of the method.

Key words: multi-machine power system; electromechanical mode; eigenvalue; inverse power method