

感应电动机群负荷引起的 电力系统机电功率振荡研究

苏国贇¹, 杜文娟^{2*}, 王海风²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209;
2. 四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065)

Research on Electromechanical Power Oscillations in Power System Caused by Induction Motor Group Load

SU Guoyun¹, DU Wenjuan^{2*}, WANG Haifeng²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China;
2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: In order to deeply investigate the internal mechanism of a finding that induction motor group (IMG) load may likely cause electromechanical power oscillation in power system, firstly, a linearized state space model of the power system with IMG load was established and the stability analysis was carried out based on it. Theoretical research shows that when the IMG load is composed of multiple identical or similar induction motors (IMs), the induction motor oscillation modes (IMOMs) of the system can be divided into two categories according to their positions on the complex plane: coincident or approximately coincident oscillation modes, and an independently distributed oscillation mode, i.e., independent IMOM. Then, a prediction index was proposed to predicate the moving direction of the independent IMOM with the change of the number of IMs. Thus, the damping level of the power system can be evaluated. Finally, the above theoretical analysis was verified by the IEEE 3 generators 9 nodes test system. The simulation results show that when the independent IMOM enters the unstable region on the complex plane, electromechanical power oscillation in the power system will be induced and the load bus node voltage may drop sharply.

KEY WORDS: induction motor group load; dynamic interaction; power system; electromechanical power oscillation

摘要: 为深入研究感应电动机群(induction motor group, IMG)负荷引起的电力系统机电功率振荡现象及其内在机理, 首先

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900602); 国家电网公司科技项目(52094017000W).

National Key R&D Program of China (2016YFB0900602); State Grid Science and Technology Project (52094017000W).

构建含感应电动机群电力系统的线性化状态空间模型, 并以此为基础进行稳定性分析。理论研究表明, 当感应电动机群由多台相同或近似相同的电动机(induction motors, IMs)构成时, 系统中感应电动机振荡模式(induction motor oscillation modes, IMOMs), 按其在复平面上的位置可分为2类: 重合或近似重合的振荡模式, 以及独立分布的振荡模式。接着, 提出一种预测指标, 可判断独立振荡模式随感应电动机数量变化在复平面上的移动方向, 进而评价系统阻尼状况。最后, 通过 IEEE 3 机 9 节点算例系统对理论分析进行仿真验证, 结果表明: 独立振荡模式移动至复平面上不稳定区域时, 将引发电力系统机电功率振荡, 并导致负荷母线节点电压的大幅跌落。

关键词: 感应电动机群负荷; 动态交互; 电力系统; 机电功率振荡

0 引言

感应电动机(induction motor, IM)是电力系统中最主要的动态负荷。国内外学者对一些大型电力事故的复算和分析^[1-3]发现, 仅采用静态负荷模型容易得出偏于冒进的分析结果。如对 1983 年瑞典电网电压崩溃事故和 1996 年北美 WSCC 电网大停电事故的研究中, 基于静态负荷模型难以重现事故过程, 考虑感应电动机等用电设备特性后, 仿真结果方能够与故障记录相互吻合。上述研究表明, IM 是影响系统稳定运行的重要因素, 因此深入探究 IM 负荷引起电力系统振荡稳定问题的内在机理具有重要的理论和现实意义。

目前, 有关 IM 引起电力系统稳定问题的研究主要集中于电压稳定性^[4-7]和功角稳定性^[8-11]层面。

文献[4]认为电压稳定问题的本质是负荷稳定问题。文献[5]分析了电动机参数变化对与转子滑差强相关特征模式的影响，强调了动态负荷在电压稳定分析中的重要作用。电压失稳机理方面，文献[6]研究表明，节点电压变化引起的电动机无功电流动态响应可引发系统电压不稳定振荡。IEEE/CIGRE 工作组^[7]指出，受到扰动后的电动机无法加速、线路越限或故障导致输电系统联系强度减弱，从而引起电动机堵转是暂态电压失稳的主要机理。此外，Milanovic 和 Hiskens 的一系列工作^[8-10]讨论了感应电动机等动态负荷对电力系统低频机电功率振荡，即同步机功角稳定性的影响。研究发现，负荷动态特性对系统低频机电振荡模式，特别是区域间振荡模式的阻尼有着显著影响。上述结论在我国台湾地区实际电网研究中得到了证实^[11]。

实际电网中负荷数量庞大且种类繁多，电力系统稳定分析往往以等值感应电动机模拟大量负荷的动态特性。文献[12]针对由多台并联运行的相同感应电动机组成的电动机群，通过概率密度函数描述各电动机电磁转矩分布，利用随机矩阵范数建立了等值机概率动态模型。文献[13]通过建立多台感应电动机的稳态等值电路，计算得到等值机电气参数。文献[12-13]将感应电动机群等值为一台电动机，减轻了计算负担，但造成了等值模型的低精度问题。文献[14-16]也意识到了该问题并指出，负荷母线上呈现出不同运行特性的电动机负荷应当分群等值为多台机。文献[17-18]对比了将感应电动机群等值为单台机或多台机的分析结果差异。文献[17]通过定义等值误差指标发现，等值为多台机时，等值误差客观存在且无法消除，但增加等值机数量可以使得误差大大减小。文献[18]比较了将感应电动机群等值为单机以及依据电动机容量大小等值为两机时的仿真结果，发现等值两机模型能够更好地描述负荷特性。与其它动态元件类似，感应电动机之间也必然存在着交互作用，这也可能是不同数量等值电动机呈现出的整体负荷特性存在差异的原因，但目前对该问题的研究几乎未有文献涉及。

为此，本文以负荷母线上由多台并联运行的感应电动机组成的感应电动机群(induction motor group, IMG)负荷为研究对象，分析由负荷失稳引起的电力系统功率振荡现象。由于研究关注的是较低频段的机电功率振荡，因此建模过程中未考虑电力网络的暂态过程。组织结构如下：首先，建立含

IMG 电力系统的线性化状态空间模型，并对系统稳定性进行分析；随后，提出一种用于预测独立感应电动机振荡模式(induction motor oscillation mode, IMOM)随 IM 数量变化，在复平面上移动方向的指标；最后，通过 IEEE 3 机 9 节点系统对理论分析进行验证，并考虑 IMG 内部各 IM 不完全相同的实际情形。

1 系统建模及稳定性分析

1.1 含 IMG 负荷电力系统的线性化状态空间模型

本节将建立含 IMG 负荷电力系统的线性化状态空间模型，如图 1 所示。外部电网经过传输线路向 IMG 负荷供电，IMG 由 $N(N \geq 2)$ 台并联运行于负荷母线上的 IM 组成；传输线路阻抗为 $r_L + jx_L$ ， $V_i = V_{xi} + jV_{yi}$ 与 $I_i = I_{xi} + jI_{yi}$ 分别表示公共 $x-y$ 坐标系下第 i 台感应电动机 $IM_i(i=1,2,\dots,N)$ 的机端电压和吸收电流。

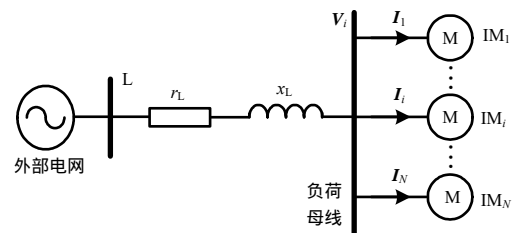


图 1 外部电网向感应电动机群负荷供电示意图

Fig. 1 Configuration of the external power system supply to IMG load

第 i 台感应电动机 IM_i 的线性化状态空间模型(详见附录 A)可表示为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta X_i = A_i \Delta X_i + B_i \Delta V_i \\ \Delta I_i = C_i \Delta X_i + D_i \Delta V_i \end{cases} \quad (1)$$

式中： Δ 表示各变量的微小变化量； A_i 为状态空间矩阵； B_i, C_i, D_i 均为系数矩阵； ΔX_i 为 IM_i 状态变量组成的矢量矩阵； $\Delta I_i = [\Delta I_{xi} \ \Delta I_{yi}]^T$ ； $\Delta V_i = [\Delta V_{xi} \ \Delta V_{yi}]^T$ 。

本文主要研究 IMG 负荷表现出的稳定性特征对电力系统稳定性的影响，因此，可将外部电网视为无穷大功率源，母线 L 视作电压恒定的无穷大节点，由图 1 可得

$$\Delta V_i = -Z_L \sum_{j=1}^N \Delta I_j = -Z_L \left(\sum_{j=1}^N C_j \Delta X_j + \Delta V_i \sum_{j=1}^N D_j \right) \quad (2)$$

化简式(2)可得

$$\Delta V_i = -Z_L (E + Z_L \sum_{j=1}^N D_j)^{-1} \sum_{j=1}^N C_j \Delta X_j \quad (3)$$

式中： $Z_L = \begin{bmatrix} r_L & -x_L \\ x_L & r_L \end{bmatrix}$ ； $E \in R^{2 \times 2}$ ，表示单位矩阵。

将式(3)代入式(1)，得到

$$\frac{d}{dt} \Delta X_i = A_i \Delta X_i - B_i Z_L (E + Z_L \sum_{j=1}^N D_j)^{-1} \sum_{j=1}^N C_j \Delta X_j \quad (4)$$

根据式(4)可得含感应电动机群电力系统的线性化状态空间模型：

$$\frac{d}{dt} \Delta X_M = A_M \Delta X_M \quad (5)$$

式中： $\Delta X_M = [\Delta X_1^T \ \Delta X_2^T \ \dots \ \Delta X_N^T]^T$ ；

$$A_M = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix} ;$$

$$\begin{cases} A_{ii} = A_i - B_i Z_L (E + Z_L \sum_{j=1}^N D_j)^{-1} C_i, i, j = 1, 2, \dots, N \\ A_{ij} = -B_i Z_L (E + Z_L \sum_{j=1}^N D_j)^{-1} C_j, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, N \end{cases} .$$

在 IMG 内部 N 台 IM 数学模型、结构参数以及运行状况等完全相同的理想情形下，各 IM 线性化状态空间模型相同，如式(1)所示。为方便起见，将式(1)中模型系数统一记作 $A_i = A_k$ ， $B_i = B_k$ ， $C_i = C_k$ ， $D_i = D_k$ ， $i = 1, 2, \dots, N$ 。此时，式(5)中 A_M 可表示为

$$A_M = \begin{bmatrix} A_p & A_n & \dots & A_n \\ A_n & A_p & \dots & A_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_n & A_n & \dots & A_p \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} A_p = A_{ii} = A_k - B_k Z_L (E + Z_L N D_k)^{-1} C_k, i = 1, 2, \dots, N \\ A_n = A_{ij} = -B_k Z_L (E + Z_L N D_k)^{-1} C_k, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, N \end{cases} .$$

为分析由式(5)、(6)描述的电力系统稳定性特征，对于状态空间矩阵 A_M ，可找到可逆矩阵 P

$$P = \begin{bmatrix} I & -I & \dots & 0 \\ 0 & I & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & -I \\ 0 & 0 & \dots & I \end{bmatrix} \quad (7)$$

使得有相似变换

$$P A_M P^{-1} = \begin{bmatrix} A_p - A_n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_p - A_n & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_n & 2A_n & \dots & A_p + (N-1)A_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_p - A_n = A_k \\ A_p + (N-1)A_n = A_k - N B_k Z_L (E + Z_L N D_k)^{-1} C_k \end{cases} .$$

由于矩阵 A_M 与 $P A_M P^{-1}$ 相似，故两矩阵具有相同的特征值。观察式(8)可知， $P A_M P^{-1}$ 为下三角型矩阵，其特征值等于对角线分块元素特征值的集合，即 $N-1$ 组矩阵 $A_p - A_n = A_k$ 特征值和 1 组矩阵 $A_p + (N-1)A_n$ 特征值的集合。

通过计算 $N-1$ 组矩阵 $A_p - A_n = A_k$ 特征值，可得 $N-1$ 个相同的 IMOM，称为重合振荡模式，统一记作 $\lambda_{N,m}$ ；计算矩阵 $A_p + (N-1)A_n$ 特征值，可得剩余的 1 个 IMOM，称为独立振荡模式，记作 λ_N 。由式(1)和(8)可知， $N-1$ 个 $\lambda_{N,m}$ 仅与 IM 自身动态特性相关，而 λ_N 在复平面上的位置与 IMG 内部 IM 数量 N 直接相关，将受到 N 台 IM 之间动态交互的影响。

1.2 含 IMG 负荷电力系统稳定性分析

考虑图 1 所示系统中外部电网经过传输线路阻抗 $r_L + jx_L$ 仅向 1 台感应电动机 IM_i 供电的情形，如图 2 所示。仍将母线 L 视作电压恒定的无穷大节点，类似式(1)~(6)的推导过程，可得含 1 台感应电动机的电力系统状态空间模型为

$$\frac{d}{dt} \Delta X_i = [A_k - B_k Z_L (E + Z_L D_k)^{-1} C_k] \Delta X_i = A_{p1} \Delta X_i \quad (9)$$

式中 A_{p1} 为式(6)中 A_p 在 $N=1$ 时的表示。

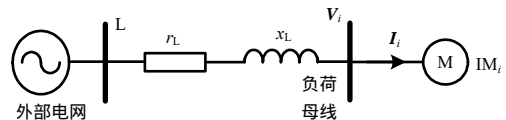


图 2 外部电网向感应电动机负荷供电示意图

Fig. 2 Configuration of the external power system supply to IM load

定义 λ_1 为由 A_{p1} 计算出的 IMOM。如果 $N(N \geq 2)$ 台 IM 均通过如图 2 所示的连接方式与外部电网独立相连，此时含 N 台电动机的电力系统将有 N 个相同的 λ_1 ；但是，如果此 $N(N \geq 2)$ 台 IM 通过如图 1 所示组成并联运行 IMG 的方式由外部电网供电，电力系统中与 IM 相关的振荡模式将包括 $N-1$ 个 $\lambda_{N,m}$ 以及 1 个 λ_N ；独立振荡模式 λ_N 在复平面上的位置受到 IM 数量 N 的影响， λ_N 与 λ_1 之间的差异 $\lambda_N - \lambda_1$ 源于 IMG 内部 N 台 IM 间的交互作用。为预测当 $N(N \geq 2)$ 取不同数值时，上述交互作用对振荡模式 λ_N 阻尼好坏的影响性质，附录 B 中推导得到了关于 $\lambda_N - \lambda_1$ 的一阶近似估计

$$\lambda_N - \lambda_1 = (N-1)d = (N-1)v^T A_{n1} v \quad (10)$$

式中： A_{n1} 即为式(6)中 A_n 在 $N=1$ 时的表示； v 为矩

阵 A_{p1} 关于 λ_1 的特征向量。

显然，指标 d 的数值在 $N=1$ 时即可得出，无需耗费计算资源。该指标实部 $\text{Real}(d)$ 的数值可能为正或为负， $\text{Real}(d)$ 的正负性说明了 λ_N 随着 IMG 内部 IM 数量 N 的变化在复平面上移动的方向。如果 $\text{Real}(d)<0$ ，说明随着 N 的不断增加， λ_N 将会在复平面上向左侧移动；相反地，如果 $\text{Real}(d)>0$ ，说明随着 N 的不断增加， λ_N 将会在复平面上不断向右侧移动，这将导致电力系统阻尼状况的不断恶化，严重情况下甚至引发电力系统振荡失稳。

本文将在下面的算例仿真中进一步验证以上理论分析所得的结论。

2 算例

2.1 系统介绍

图 3 为仿真分析采用的含 IMG 负荷的 IEEE 3 机 9 节点算例系统结构示意图，系统参数来源于文献[19]。节点 7 处负荷采用 IMG 与静态恒阻抗并联的负荷模型，其余节点处负荷均为恒定阻抗；同步发电机采用 3 阶模型以及 1 阶简化 AVR 模型^[19]；IM 采用 3 阶模型^[19]，结构参数源于文献[3]提供的“默认型电机(default motor)”参数，详见附件 C。

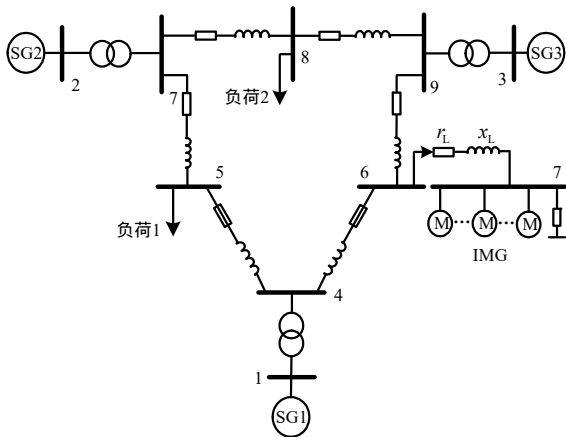


图 3 含感应电动机群负荷的 IEEE 3 机 9 节点算例系统

Fig. 3 Configuration of the example IEEE 3 generators 9 nodes power system with IMG load

2.2 算例 A：理想情况下 IMG 负荷引发电力系统振荡分析

本节主要研究理想情况下，即 IMG 内部各台 IM 结构参数及运行状况完全相同时，由与 IMG 相关的振荡模式负阻尼引发的电力系统振荡失稳现象。图 3 算例系统中，相较于标准负荷数据，调整母线 7 所在区域有功负荷为 210MW，无功负荷成比例设置。仿真中将逐渐增加 IMG 内部 IM 数量，每台 IM 有功功率均为 20MW，功率因数为 0.8，为

保证电力系统潮流分布不发生显著变化，以消除潮流因素对分析结果的干扰，当 IM 数量不断增加时，调节静态恒阻抗大小以维持节点 7 处负荷大小近似不变。以上过程总结来说是，不断地将静态负荷替换为数量逐渐增加的 IM 负荷。

图 3 中，对于 IMG 负荷来说，同步机 SG1—SG3 及输电线路组成了外部电网。第 1 节理论推导建立在认为外部电网为无穷大电源基础上，沿着该分析思路，将母线 6 作为无穷大节点。首先，通过式(9)中状态空间矩阵 A_{p1} 计算出仅有 1 台 IM，即 $N=1$ 时的 IMOM， $\lambda_1=-8.811+j36.412$ ，频率为 5.80Hz，具有良好的模式阻尼， λ_1 以空心三角标记于图 4 中，此时 λ_1 即为独立振荡模式 λ_N 。随后，通过式(9)、(10)计算得到指标 $d=1.273+j2.513$ ，其实部 $\text{Real}(d)=1.273>0$ ，根据 1.2 节中的分析，当 $\text{Real}(d)>0$ 时，随着 IMG 内部 IM 数量 N 的增加，独立振荡模式 λ_N 在复平面上的位置预计将会不断向右侧移动，造成系统阻尼状况的不断恶化。

为验证指标 d 预测结果的正确性，当 IM 数量为 $N(N \geq 2)$ 时，通过式(5)中状态空间矩阵 A_M 计算得到 N 个 IMOM，其中 $N-1$ 个模式完全相等，即重合振荡模式 $\lambda_{N,m}$ ，剩余的 1 个模式即为独立振荡模式 λ_N 。当 IM 数量 N 由 2 增加至 9 时，模式 $\lambda_{N,m}$ 、 λ_N 在复平面上的移动轨迹如图 4 所示。图中， $\lambda_{N,m}$ 以左上角蓝色圆圈表示， λ_N 以黑色空心圆圈表示，箭头指示模式的移动方向。需要说明的是，以上分析未考虑外部电网的动态特性。为探究同步发电机等动态设备对分析结果以及所得结论的影响，本文另外形成包含全系统所有动态元件的状态空间矩阵 A ，通过计算矩阵 A 的特征值得到与 λ_N 对应的振荡模式 $\hat{\lambda}_N$ ， $\hat{\lambda}_N$ 在复平面上的移动轨迹如图 4 中的红色实心圆圈所示。

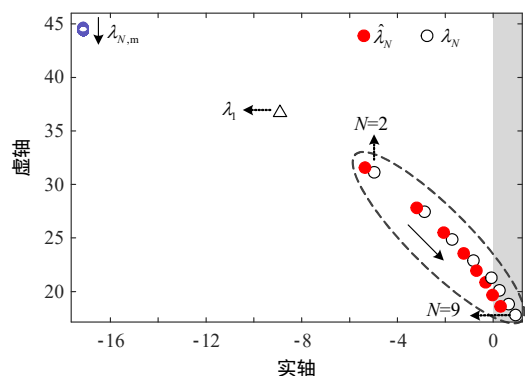


图 4 系统振荡模式轨迹(IM 数量 N 增加)(算例 A)

Fig. 4 Modal trajectories of the example power system when the number of IM N increasing(study case A)

由图4可知,当IM数量 $N \geq 2$ 时,随着 N 的逐渐增大,独立振荡模式 λ_N 及对应的 $\hat{\lambda}_N$ 逐渐在复平面上向右侧移动,表明系统的稳定性在逐渐减弱,这也验证了指标 d 用于预测 λ_N 移动方向的有效性;当 $N=7$ 或 8 时, λ_N 及 $\hat{\lambda}_N$ 分别穿越虚轴达到右半平面,表明此时电力系统中出现了振荡模式失稳。由于IM数量增加过程中,算例系统的潮流分布几乎不变,故而重合振荡模式 $\lambda_{N,m}$ 集中在复平面左上角较小的区域; $\lambda_{N,m}$ 也是式(8)中矩阵 $A_p - A_n = A_k$ 的特征值,由于矩阵 A_k 形式与IM数量 N 无关,因此仿真结果与理论推导相互吻合。

表1列举了 N 分别取2至9时的振荡模式 λ_N 和 $\hat{\lambda}_N$ 的计算数值。结合图4及表1可知, λ_N 和 $\hat{\lambda}_N$ 在复平面上相互接近,表明 λ_N 的阻尼减弱是随IM数量增加时IMG自身表现出的稳定性特征,外部电网中同步机的动态特性对其影响不大。

图5为 N 分别取2和5时对振荡模式 $\hat{\lambda}_N$ 的参与性分析结果。图5(a)表明,IM₁、IM₂在 $\hat{\lambda}_N$ 中均具有很强的参与性,且主要为转速变量 $\Delta\omega_r$ 以及一个暂态电动势变量 $\Delta E'_y$,这说明IMG内部2台电动机之间发生了强烈的模式耦合;图5(b)中每一柱形均表示对应编号的IM所有状态变量对 $\hat{\lambda}_N$ 的参

表1 系统振荡模式 $\lambda_N, \hat{\lambda}_N$ 数值(算例A)

Tab. 1 Values of oscillation modes(λ_N and $\hat{\lambda}_N$) of the example power system(study case A)

N	λ_N	$\hat{\lambda}_N$
2	$-5.045 + j31.127$	$-5.183 + j31.620$
3	$-2.993 + j27.510$	$-3.189 + j28.142$
4	$-1.723 + j24.861$	$-1.977 + j25.604$
5	$-0.867 + j22.821$	$-1.178 + j23.657$
6	$-0.253 + j21.191$	$-0.622 + j22.107$
7	$0.207 + j19.850$	$-0.220 + j20.837$
8	$0.564 + j18.723$	$0.079 + j19.772$
9	$0.848 + j17.757$	$0.306 + j18.862$

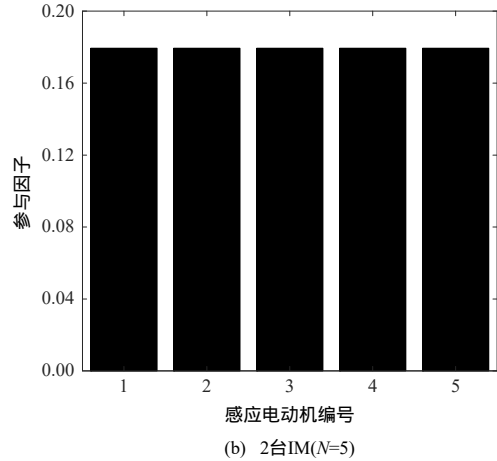
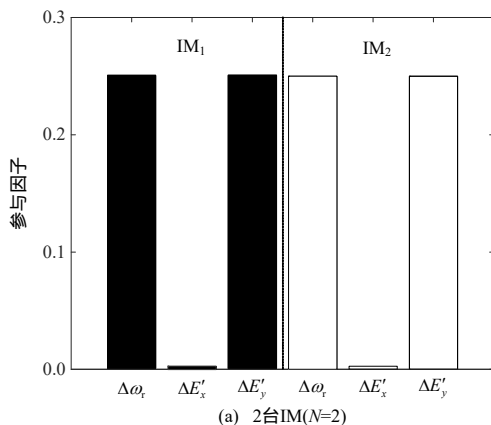
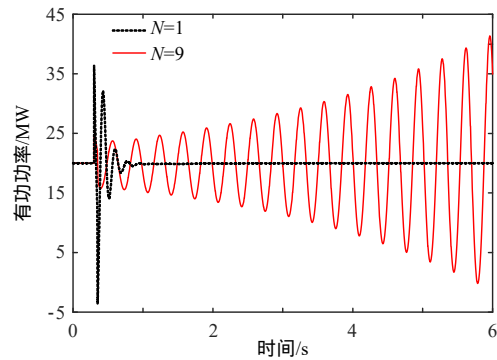


图5 $\hat{\lambda}_N$ 参与因子计算结果(算例A)

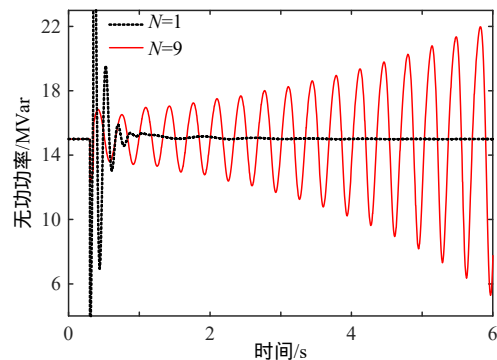
Fig. 5 Participation factors for $\hat{\lambda}_N$ (study case A)

与因子之和;图5表明 N 取不同数值时($N \geq 2$),IMG内部 N 台IM在模式 $\hat{\lambda}_N$ 中的参与性相等,这说明了此 N 台机之间发生了较强的动态交互,且各自对 $\hat{\lambda}_N$ 的贡献大小一致,正是该交互作用使得 $\hat{\lambda}_N$ 或 λ_N 偏离了振荡模式 λ_1 。

为验证以上通过线性化分析得到的结论,展示感应电动机群负荷模式失稳引起电力系统机电功率振荡的现象,图6针对负荷母线7分别接入1台或9台IM,即 $N=1$ 或 9 时,给出了时域仿真结果。扰动设置为:0.3s时母线8处发生了30%的负荷损失,故障持续0.05s后恢复。图6(a)~(d)分别展示了IM₁有功功率、IM₁无功功率、IM₁转子转差率



(a) IM₁有功功率



(b) IM₁无功功率

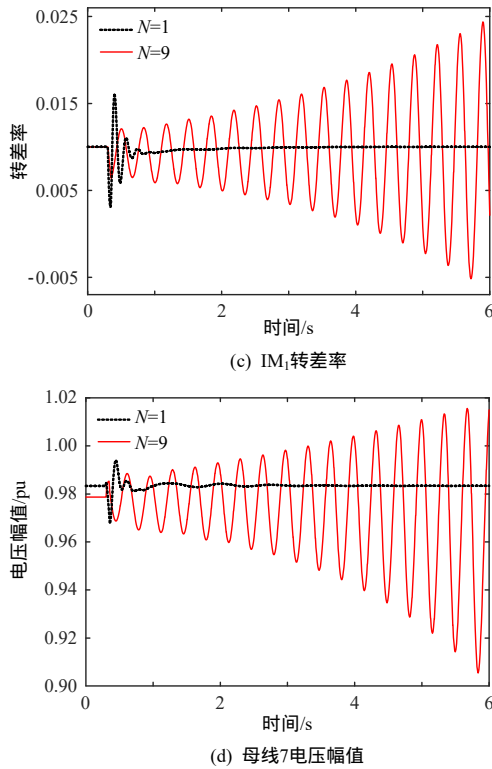


图 6 时域仿真结果(算例 A)

Fig. 6 Time domain simulation results(study case A) 以及母线 7 电压幅值的变化。可见, $N=1$ 时, 仿真波形在扰动结束后快速收敛; 而 $N=9$ 时, IM_1 功率快速发散振荡, 说明与 IMG 相关的振荡模式失稳引发了电力系统机电功率振荡。此外, 图 6(d)显示 IMG 所在负荷母线 7 电压幅值降落接近 8%, 并发生周期性发散振荡, 导致了电压稳定性问题。

2.3 算例 B：实际情况下 IMG 负荷引发电力系统振荡分析

实际情形下, IMG 内部各台 IM 不可能完全相同, 各 IM 在结构参数、运行状况、消耗功率等多方面均可能存在差异, 因此本节将研究实际情形下, 由 IMG 引起的电力系统振荡失稳问题。基于图 3 算例系统, 仿真中仍将逐渐增加 IMG 内部 IM 数量, 负荷设置情况与算例 A 相同; 与 2.2 节不同的是, IM_1 有功功率设为 18MW, 功率因数为 0.8, IM 数量逐渐增加时, 各 IM 有功功率以步长 2MW 增长, 即 IM_2 有功功率为 22MW, IM_3 有功功率为 24MW.....。各 IM 结构参数在附录 C 典型参数 $\pm 5\%$ 范围内随机赋值。以上过程中, 调节母线 7 处的静态恒阻抗大小以维持该节点负荷近似不变。

当 IM 数量 $N=1$ 时, 根据式(9)、(10)计算出的振荡模式 $\lambda_1=-9.363+j37.083$, 振荡频率为 5.90Hz, λ_1 位置以空心三角标记于图 7 中; 指标 $d=1.467+j3.098$, 实部 $Real(d)=1.467 > 0$ 。当 $N \geq 2$ 时, 根据

式(5)中状态矩阵 A_M 可计算得到 $N-1$ 个近似相等的振荡模式, 称之为近似重合振荡模式, 仍统一记作 $\lambda_{N,m}$, 当 N 分别取 3、5、7 时的 $\lambda_{N,m}$ 以蓝色圆圈标记 $N-1$ 个 $\lambda_{N,m}$ 存在差异的原因在于 IMG 内部各 IM 不完全相同; 剩余的 1 个振荡模式即为独立振荡模式 λ_N , 当 N 由 2 增加至 8 时, λ_N 在复平面上的移动轨迹如图 7 中黑色空心圆圈所示。此外, 红色实心圆圈表示根据全系统状态空间矩阵 A 计算出的振荡模式 $\hat{\lambda}_N$, $\hat{\lambda}_N$ 与 λ_N 之间的差异体现了外部电网同步机等设备动态特性对独立振荡模式 λ_N 的影响。观察图 7 可见, 随着 N 增大, λ_N 与 $\hat{\lambda}_N$ 逐渐向复平面右侧移动, 当 $N=6、7$ 时, λ_N 及 $\hat{\lambda}_N$ 分别穿越虚轴达到右半平面, 模式阻尼为负。图 7 研究表明, 算例 A 在假定 IMG 内部各 IM 完全相同时观察到的模式失稳现象, 在实际情形下亦可能发生。表 2 展示了图 7 中振荡模式 $\hat{\lambda}_N$ 与 λ_N 的具体数值。

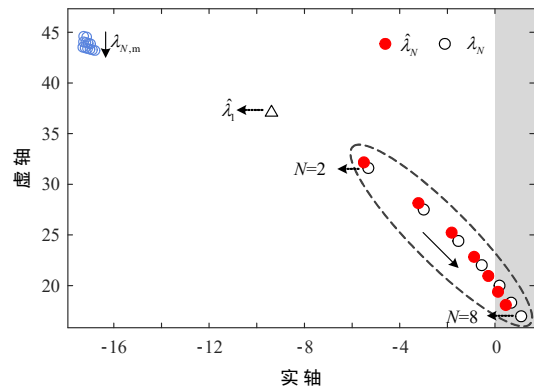


图 7 系统振荡模式轨迹(IM 数量 N 增加)(算例 B)
Fig. 7 Modal trajectories of the example power system when the number of IM N increasing (study case B)

表 2 系统振荡模式 $\lambda_N, \hat{\lambda}_N$ 数值(算例 B)

Tab. 2 Values of oscillation modes(λ_N and $\hat{\lambda}_N$) of the example power system (study case B)

N	λ_N	$\hat{\lambda}_N$
2	-5.321+j31.565	-5.453+j32.042
3	-2.993+j27.510	-3.189+j28.142
4	-1.526+j24.412	-1.791+j25.174
5	-0.536+j21.962	-0.876+j22.839
6	0.167+j19.972	-0.255+j20.951
7	0.685+j18.317	0.177+j19.389
8	1.081+j16.915	0.485+j18.071

图 8 展示了 N 分别取 3、7 时, 模式 $\hat{\lambda}_N$ 的参与因子计算结果。图 8 中每一柱形均表示 IMG 内部对应编号的 IM 所有状态变量对 $\hat{\lambda}_N$ 的参与因子之和, 由图可知, N 台 IM 均参与 $\hat{\lambda}_N$ 中, 表明此 N

台 IM 之间发生了强烈的动态交互；与图 5 不同的是，由于各台机运行状况不同，因此它们各自在 $\hat{\lambda}_N$ 中的参与性也存在差异，并观察到功率较大的 IM 具有更高的参与因子。

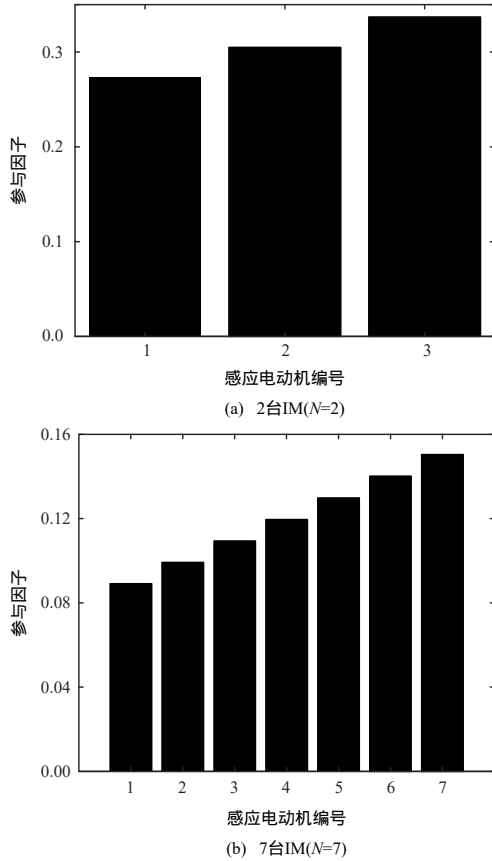


图 8 $\hat{\lambda}_N$ 参与因子计算结果(算例 B)

Fig. 8 Participation factors for $\hat{\lambda}_N$ (study case B)

图 9 针对算例 B，给出了当负荷母线 7 处接入 1 台或 8 台 IM，即 $N=1$ 或 8 时的时域仿真结果，故障设置与算例 A 相同。图 9(a)—(d) 分别展示对比了 IM₁ 有功功率、IM₁ 无功功率、IM₁ 转子转差率以及母线 7 电压幅值变化。由图 9 可知， $N=8$ 时各仿真波形快速发散振荡，说明此时电力系统在受到扰动后已经不能维持稳定运行。此外，母线 7 处电压幅值持续跌落，引发了电压稳定性问题。时域仿

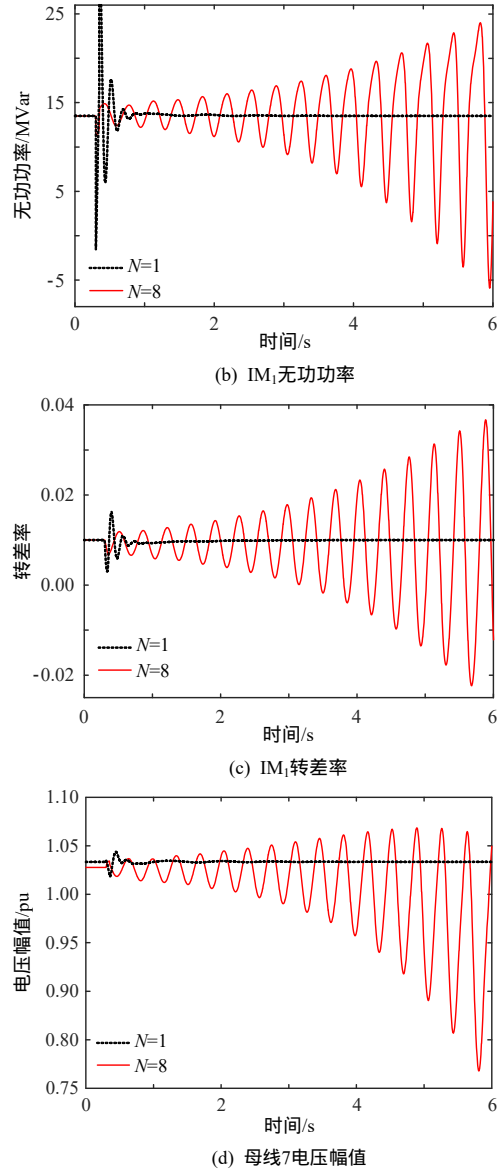
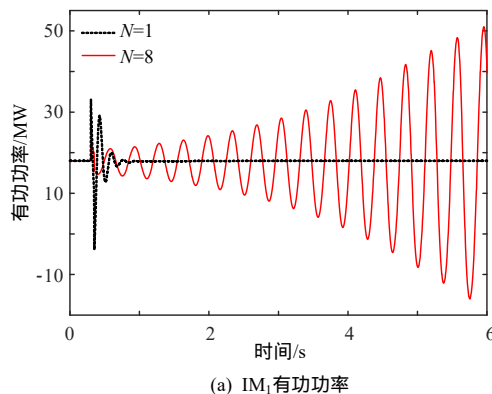


图 9 时域仿真结果(算例 B)

Fig. 9 Time domain simulation results (study case B)

真验证了图 7 的分析结果。

3 结论

本文基于构建的含感应电动机群电力系统的线性化状态空间模型，分析了感应电动机群负荷引起的电力系统机电功率振荡。通过理论推导和仿真验证，得出以下结论：

- 1) 构成感应电动机群负荷的 N 台电动机相同或近似相同时， N 台电动机间的强交互作用使得电力系统中 N 个感应电动机振荡模式分为 2 类： $N-1$ 个模式重合或近似重合；1 个模式独立分布，且其在复平面上的位置受到电动机数量 N 变化的影响。
- 2) 提出一种用于预测独立分布的感应电动机振荡模式随电动机数量 N 变化，在复平面上移动方向的指标，其预测的准确性在仿真中得到了验证。

3) 独立振荡模式随着电动机数量 N 的增加在复平面上不断向右侧移动时, 电力系统的阻尼水平逐渐降低, 当该模式穿越虚轴进入右半平面时, 将引发电力系统机电功率振荡, 并造成负荷节点电压的大幅跌落。

本文工作表明, 电力系统仿真分析中应当注意多台并联运行的感应电动机负荷导致的系统振荡模式阻尼退化问题, 所做研究对实际运行具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Walve K . Modeling of power system components at severe disturbances[C]//International Conference on Large High Voltage Electrical System . Paris : CIGRE , 1986 .
- [2] Kosterev D N , Taylor C W , Mittelstadt W A . Model validation for the August 10 , 1996 WSCC system outage[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1999 , 14(3) : 967-979 .
- [3] Pereira L , Kosterev D , Mackin P , et al . An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2002 , 17(4) : 1108-1115 .
- [4] Taylor C W . Power system voltage stability[M] . New York , USA : McGraw Hill , 1994 : 261-269 .
- [5] 孙华东, 周孝信, 李若梅 . 计及感应电动机负荷的静态电压稳定性分析[J] . 中国电机工程学报, 2005 , 25(24) : 1-7 .
Sun Huadong , Zhou Xiaoxin , Li Ruomei . Static voltage stability analysis considering induction motor loads [J] . Proceedings of the CSEE , 2005 , 25(24) : 1-7(in Chinese) .
- [6] De Mello F P , Feltes J W . Voltage oscillatory instability caused by induction motor loads[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1996 , 11(3) : 1279-1285 .
- [7] Kundur P , Paserba J , Ajjarapu V , et al . Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2004 , 19(3) : 1387-1401 .
- [8] Milanovic J V , Hiskens I A . Effects of load dynamics on power system damping[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1995 , 10(2) : 1022-1028 .
- [9] Hiskens I A , Milanovic J V . Load modelling in studies of power system damping[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1995 , 10(4) : 1781-1788 .
- [10] Hiskens I A , Milanovic J V . Locating dynamic loads which significantly influence damping[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1997 , 12(1) : 255-261 .
- [11] Kao W S . The effect of load models on unstable low-frequency oscillation damping in Tai-power system experience w/wo power system stabilizers[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2001 , 16(3) : 463-472 .
- [12] Stankovic A M , Lesieutre B C . A probabilistic approach to aggregate induction machine modeling[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1996 , 11(4) : 1983-1989 .
- [13] Franklin D C , Morelato A . Improving dynamic aggregation of induction motor models[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1994 , 9(4) : 1934-1941 .
- [14] 侯俊贤, 汤涌, 张红斌, 等 . 感应电动机的综合方法研究[J] . 电网技术, 2007 , 31(4) : 36-41 .
Hou Junxian , Tang Yong , Zhang Hongbin , et al . Study on integration method for induction motor[J] . Power System Technology , 2007 , 31(4) : 36-41(in Chinese) .
- [15] Taleb M , Akbaba M , Abdullah E A . Aggregation of induction machines for power system dynamic studies[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1994 , 9(4) : 2042-2048 .
- [16] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance . Load representation for dynamic performance analysis(of power systems)[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1993 , 8(2) : 472-482 .
- [17] 郑宁浪 . 感应电动机负荷模型相关问题的研究[D] . 杭州 : 浙江大学, 2011 .
Zheng Ninglang . Research on related problems of induction motor load model[D] . Hangzhou : Zhejiang University , 2011(in Chinese) .
- [18] Ahmed-Zaid S , Taleb M . Structural modeling of small and large induction machines using integral manifolds [J] . IEEE Transactions on Energy Conversion , 1991 , 6(3) : 529-535 .
- [19] Kundur P . Power system stability and control[M] . New York , USA : McGraw-Hill , 1994 .

附录 A 感应电动机线性化状态空间模型

忽略定子磁链暂态过程, 感应电动机在公共 $x-y$ 坐标系下的动态模型^[20]如式(A1)一式(A3)所示。

$$\begin{cases} 2H \frac{d\omega}{dt} = -(T_m - E'_x I_x - E'_y I_y) \\ \frac{T'_0}{\omega_0} \frac{dE'_x}{dt} = -E'_x + (X - X') I_y - (1 - \omega_r) T'_0 E'_y \\ \frac{T'_0}{\omega_0} \frac{dE'_y}{dt} = -E'_y - (X - X') I_x + (1 - \omega_r) T'_0 E'_x \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} I_x = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s (V_x - E'_x) - X' (V_y - E'_y)] \\ I_y = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s (V_y - E'_y) + X' (V_x - E'_x)] \end{cases} \quad (A2)$$

式中: $X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$; $X = X_s + X_m$; $T'_0 = \frac{X_r + X_m}{R_r}$; X_r 、 X_s 、 X_m 分别为转子电抗、定子电抗、激磁电抗; R_r 、 R_s 分别为转子电阻、定子电阻; H 为转子惯性常数; E'_x 、 E'_y 分别为 x 、 y 轴暂态电动势; T_m 为机械负载转矩; $s_r = 1 - \omega_r$ 为

转子转差率； ω_0 为同步转速。

$$T_m = (A_2\omega_r^2 + A_1\omega_r + A_0)T_{m0} \quad (A3)$$

将式(A3)线性化为

$$\Delta T_m = (2A_2 + A_1)T_{m0}\omega_0\Delta\omega_r \quad (A4)$$

将式(A1)线性化，并将式(A4)代入，得到

$$\begin{cases} 2H \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \Delta T_c - (2A_2 + A_1)T_{m0}\omega_0\Delta\omega_r \\ \frac{T'_0}{\omega_0} \frac{d\Delta E'_x}{dt} = -\Delta E'_x + (X - X')\Delta I_x - (1 - \omega_{r0}) \cdot \\ \quad T'_0\Delta E'_y + T'_0E'_{y0}\Delta\omega_r \\ \frac{T'_0}{\omega_0} \frac{d\Delta E'_y}{dt} = -\Delta E'_y + (X - X')\Delta I_x + (1 - \omega_{r0}) \cdot \\ \quad T'_0\Delta E'_x - T'_0E'_{x0}\Delta\omega_r \end{cases} \quad (A5)$$

式中 $\Delta T_c = I_{x0}\Delta E'_x + E'_{x0}\Delta I_x + I_{y0}\Delta E'_y + E'_{y0}\Delta I_y$ 。

将式(A2)线性化为

$$\begin{cases} \Delta I_x = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(\Delta V_x - \Delta E'_x) - X'(\Delta V_y - \Delta E'_y)] \\ \Delta I_y = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(\Delta V_y - \Delta E'_y) + X'(\Delta V_x - \Delta E'_x)] \end{cases} \quad (A6)$$

将式(A6)代入式(A5)，并化简可得

$$\frac{d}{dt} \Delta X = A \Delta X + B \Delta V \quad (A7)$$

式中： $\Delta X = [\Delta\omega_r \ \Delta E'_x \ \Delta E'_y]^T$ ； $\Delta V = [\Delta V_x \ \Delta V_y]^T$ ；

$A =$

$$\begin{bmatrix} \frac{-(2A_2 + A_1)\omega_{r0}T_{m0}}{2H} & \frac{I_{x0}Z_{eq} - E'_{x0}R_s - E'_{y0}X'}{2HZ_{eq}} & \frac{I_{y0}Z_{eq} + E'_{x0}X' - E'_{y0}R_s}{2HZ_{eq}} \\ \omega_0 E'_{y0} & -\omega_0 \frac{R_s^2 + X'X}{T'_0Z_{eq}} & \omega_0 [1 - \omega_{r0} - \frac{R_s(X - X')}{T'_0Z_{eq}}] \\ -\omega_0 E'_{x0} & \omega_0 [1 - \omega_{r0} - \frac{R_s(X - X')}{T'_0Z_{eq}}] & -\frac{\omega_0}{T'_0} + \frac{\omega_0 X'(X - X')}{T'_0Z_{eq}} \end{bmatrix} ;$$

$$B = \frac{1}{Z_{eq}} \begin{bmatrix} \frac{E'_{x0}R_s + E'_{y0}X'}{2H} & \frac{-E'_{x0}X' + E'_{y0}R_s}{2H} \\ \frac{\omega_0 X'(X - X')}{T'_0} & \frac{\omega_0 R_s(X - X')}{T'_0} \\ \frac{\omega_0 R_s(X - X')}{T'_0} & \frac{-\omega_0 X'(X - X')}{T'_0} \end{bmatrix} ; Z_{eq} = R_s^2 + X'^2。$$

将式(A6)改写为

$$\Delta I = C \Delta X + D \Delta V \quad (A8)$$

式中： $\Delta I = [\Delta I_x \ \Delta I_y]^T$ ； $C = \frac{1}{Z_{eq}} \begin{bmatrix} 0 & -R_s & X' \\ 0 & -X' & -R_s \end{bmatrix}$ ； $D = \frac{1}{Z_{eq}}$ 。

$$\begin{bmatrix} R_s & -X' \\ X' & R_s \end{bmatrix}。$$

至此，由式(A7)、式(A8)组成了如式(1)所示感应电动机线性化状态空间模型。

附录 B 关于式(10)的推导证明

式(1)中 ΔI_i 的存在表明第*i*台感应电动机IM_{*i*}与感应电动机群内部其余电动机之间存在动态交互作用。通常情形下，该交互作用相对较弱，即 $\Delta I_i \approx 0$ ，这意味着可引入一个较小的数 $1 \gg \varepsilon > 0$ 用于描述式(1)中的输出方程，即

$$\Delta I_i = C_i \Delta X_i + D_i \Delta V = \varepsilon C_{pi} \Delta X_i + D_i \Delta V \quad (B1)$$

当 $N=1$ 时，由式(6)、(B1)可得

$$A_{n1} = -\varepsilon B_k Z_L (E + Z_L D_k)^{-1} C_{pk} = \varepsilon A_{pn1} \quad (B2)$$

式中： $B_k = B_i$ ； $B_{pk} = C_{pi}$ ； $D_k = D_i$ ； A_{n1} 为 A_n 在 $N=1$ 时的表示。

定义 v 为矩阵 A_{p1} 关于 λ_1 的特征向量，当 A_{p1} 变化至 $A_{p1} + (N-1)A_{n1} = A_{p1} + \varepsilon(N-1)A_{pn1}$ 时， λ_1 随之变化至 λ_{N0} 。由于当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时， $A_{p1} + (N-1)A_{n1} = A_{p1} + \varepsilon(N-1)A_{pn1} \rightarrow A_{p1}$ ，根据特征值灵敏度理论，关于 λ_N 的一阶近似可表示为

$$\lambda_N = \lambda_1 + \varepsilon(N-1)v^T A_{pn1} v = \lambda_1 + (N-1)v^T A_{pn1} v = \lambda_1 + (N-1)d \quad (B3)$$

因此，式(10)得证。

附录 C 参数取值

图3中节点6和节点7间连接阻抗 $r_L + jx_L = 0.001 + j0.01$ ，感应电动机参数^[3]： $R_s = 0.0068$ ， $X_s = 0.1$ ， $R_r = 0.018$ ， $X_r = 0.07$ ， $X_m = 3.4$ ， $H = 0.5$ ， $A_2 = 1$ ， $A_1 = A_0 = 0$ 。



苏国贇

收稿日期：2018-09-03。

作者简介：

苏国贇(1994)，男，硕士，工程师，主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制，sugyncepu@163.com；

*通信作者：杜文娟(1979)，女，博士，教授，主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制，ddwenjuan@qq.com；

王海风(1960)，男，博士，教授，主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制，hfwang60@qq.com。

(责任编辑 乔宝榆)

Research on Electromechanical Power Oscillations in Power System Caused By Induction Motor Group Load

SU Guoyun¹, DU Wenjuan^{2*}, WANG Haifeng²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd. 2. Sichuan University)

KEY WORDS: Induction motor group load; dynamic interaction; power system; electromechanical power oscillation

Induction motors (IMs) are the most typical and representative dynamic loads in the power system. Importance of IMs in the study of power system dynamic stability was well demonstrated by intensive studies for large-scale power accidents occurred since 1980s, such as Swedish grid voltage collapse in 1983 and North American WSCC system blackout in 1996, etc. So far, researches on the power system instability caused by IMs mainly focus on two aspects, i.e., voltage instability and power system angle instability, and have made many significant achievements. However, there are still lots of problems that cannot be solved effectively.

In a power system, the number of IMs can be massive. It is necessary to study the effects of the overall characteristic of those IMs on power system stability. In this paper, a group of multiple IMs operating in parallel are defined as the induction motor group (IMG) load. This paper reports and investigates the finding that IMG load may likely cause electromechanical power oscillation in the power system. It is found that when the IMG load is composed of N identical or similar IMs, the N induction motor oscillation modes (IMOMs) of the system can be divided into two categories due to the strong dynamic interaction between the N motors. An IMOM named as *independent IMOM*, λ_N is independently located on the complex plane and affected by the number of IMs, N . The other $N-1$ IMOMs coincide or approximately coincide with each other which are collectively named as coincident or approximately coincident IMOM, $\lambda_{N,m}$. In order to investigate the influence of the number of IMs on the *independent IMOM*, a predication index d is proposed to predicate the moving direction of λ_N with the increase of N . The index is presented and explained as follows.

$$\lambda_N - \lambda_1 = (N - 1)d = (N - 1)\mathbf{v}^T \mathbf{A}_{n1} \mathbf{v} \quad (1)$$

The predication index can be calculated when there is only one induction motor on the load bus, so the calculation burden is not very heavy. The moving direction of the independent IMOM on the complex

plane with the increase of N depends on whether the real part of the index $Real(d)$ is positive or negative. Analysis show that if $Real(d) > 0$, the *independent IMOM* will continue move towards the right on the complex plane with the increase of N , leading to the damping degradation of the power system. When the independent IMOM enters the unstable region in the worst case, electromechanical power oscillation will be induced and the load bus node voltage may drop sharply.

As depicted in Fig. 1, λ_1 indicates the position of IMOM when $N=1$. $\hat{\lambda}_N$ is the corresponding mode to λ_N when the dynamic characteristic of external grid is considered. Simulation results show that the *independent IMOM*, λ_N moves towards the right with the increase of N and starts entering the unstable region when $N=7$.

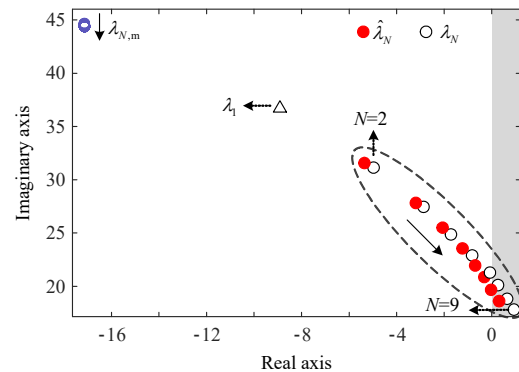


Fig. 1 Modal trajectories when the number of IMs N increasing

The time domain simulation result given in Fig.2 shows that when the *independent IMOM* is negatively damped ($N=9$), electromechanical power oscillation occurs in the power system.

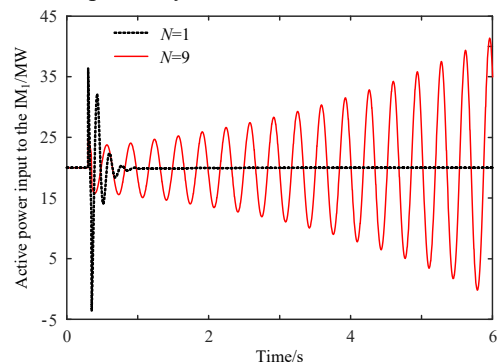


Fig. 2 Time domain simulation results