

电力系统机电扰动的传播特性

郭成, 李群湛, 王德林

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Propagation Characteristic of Electromechanical Disturbance in Power System

GUO Cheng, LI Qun-zhan, WANG De-lin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The low-frequency oscillation mode in typical power supply system is researched by small signal method. During the disturbance, the increment of generator's active power consists of the disturbances of some local modes and interregional modes; for electromechanical disturbance to different generators in the same power supply region, the corresponding local mode components are canceled out one another, however, the interregional mode components will be enhanced. It is further verified by simulation results that the penetrative propagation of electromechanical disturbance will occur in power system, and the propagating speed is related to the rotary inertia of generator.

KEY WORDS: low-frequency oscillation; local mode; inter-regional mode; propagation of electromechanical disturbance; Prony analysis

摘要: 采用小扰动方法分析了典型供电系统的低频振荡模式。在扰动情况下, 发电机有功功率增量由若干本地模式及区间模式扰动组成。对于相同供电区域内不同发电机的机电扰动, 其相应本地模式分量之间是相互抵消的, 而区间模式分量之间则会增强。仿真分析进一步验证了机电扰动会在电力系统中发生渗透性传播, 其传播速度与发电机的转动惯量相关。

关键词: 低频振荡; 本地模式; 区间模式; 机电扰动传播; Prony 分析

0 引言

低频振荡又称功率振荡, 其实质是机电扰动引起的发电机功角间的相对振荡。它使发电机的输出功率发生周期性波动^[1-8]。广义地讲, 只要电力系统是动态的, 在扰动作用下均可产生功率振荡, 只是在弱阻尼情况下, 系统不能快速完成这一振荡过渡过程, 而在负阻尼情况下, 则会出现增幅振荡情况。在系统发生低频振荡时, 每台发电机会相对于其它发电机振荡, 同时相连机群之间也会产生相互振荡^[9]。由此低频振荡可分为本地模式和区间

模式。本地模式体现的是同一供电区域内机组之间的相对振荡, 而区间模式则是机群之间相互作用的结果。

人们对低频振荡问题的研究, 从未从机电扰动的传播特性角度分析过, 但电力系统的许多重要问题都与能量在系统中的运动有关^[10-14]。本文将研究机电扰动的传播特性, 证实由区域内机组间对扰动的相互作用而产生的本地模式会相互削弱。而同一供电区域内的区间模式, 则会相互叠加和增强, 使联络线成为功率振幅较大的地方。此外, 仿真分析还将验证文献[13]提出的在互联系统中, 机电扰动可通过联络线进行渗透性传播, 其传播速度与发电机的转动惯量相关。

1 低频振荡模式分析

图 1 为一个典型系统, n 台机组并联后与系统互联。为便于表述, 将系统等值为一个机组 G_{n+1} 。

$$P_{ci} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n E_i E_j (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (1)$$

式中: E_i 为发电机 i 的恒定电势; G_{ii} 为发电机 i 所在节点的输入导纳实部; G_{ij} 为节点 i, j 间转移导纳的实部; B_{ij} 为节点 i, j 间转移导纳的虚部。

令 $\delta_{ij} = \delta_{ij0} + \Delta \delta_{ij}$, P_{ci} 的增量方程可表示为

$$\Delta P_{ci} = \sum_{j=1, j \neq i}^n P_{sij} \Delta \delta_{ij} \quad (2)$$

发电机 i 输出的电磁功率可描述为^[9]

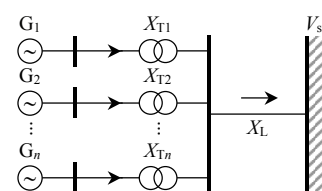


图 1 n 台发电机与系统并网

Fig. 1 n generators interconnected with system

$$P_{sij} = \left. \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \right|_{\delta_{ij0}} = E_i E_j (B_{ij} \cos \delta_{ij0} - G_{ij} \sin \delta_{ij0}) \quad (3)$$

其中 δ_{ij0} 为初始值。

由式(2)(3)可知, 第 i 台发电机的小扰动电功率响应的增量, 体现的是对其它电机或机群的功率振荡的叠加。图 1 中, 发电机 G_1 的电功率增量为

$$\Delta P_{1e} = P_{S12} \Delta \delta_{12} + P_{S13} \Delta \delta_{13} + \dots + P_{S1(n+1)} \Delta \delta_{1(n+1)}$$

采用 2 阶发电机模型, 以 G_1 为参考建立系统的线性化状态方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta}_{12} \\ \vdots \\ \Delta \dot{\delta}_{1(n+1)} \\ \Delta \dot{\omega}_{12} \\ \vdots \\ \Delta \dot{\omega}_{1(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ \mathbf{A}'_{n \times n} & \mathbf{A}''_{n \times n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_{12} \\ \vdots \\ \Delta \delta_{1(n+1)} \\ \Delta \omega_{12} \\ \vdots \\ \Delta \omega_{1(n+1)} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} \Delta \delta_{12} \\ \vdots \\ \Delta \delta_{1(n+1)} \\ \Delta \omega_{12} \\ \vdots \\ \Delta \omega_{1(n+1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其特征方程为

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{B}| = \begin{vmatrix} \lambda_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ \mathbf{A}'_{n \times n} & (\lambda - \mathbf{A}''_{n \times n}) \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

式中: 矩阵 $\mathbf{A}'_{n \times n}$ 中的元素取决于发电机转动惯量及同步功率系数; 矩阵 $\mathbf{A}''_{n \times n}$ 中的元素取决于发电机转动惯量及阻尼系数。

由于特征值是成对的, 令 $\lambda_{1,2} = \sigma_1 \pm j\omega_1$ 、 \dots 、 $\lambda_{1,n+1} = \sigma_n \pm j\omega_n$ 是式(5)的解, 则

$$\Delta \delta_{1i} = C_i e^{\lambda_{i,t}}, \quad i = 2, \dots, n+1 \quad (6)$$

事实上, $\lambda_{1,2}, \dots, \lambda_{1,n}$ 均为振荡的本地模式, 只有 $\lambda_{1,n+1}$ 为振荡的区间模式。 $f_1 = \omega_1/2\pi, \dots, f_{n-1} = \omega_{n-1}/2\pi, f_n = \omega_n/2\pi$ 分别对应振荡的频率。因此振荡的输出响应为

$$y = \sum_{i=2}^{n+1} C_i e^{\lambda_{i,t}}, \quad i = 2, \dots, n+1 \quad (7)$$

这样

$$\Delta P_1 = C_{12} e^{\lambda_{1,2}t} + \dots + C_{1(n+1)} e^{\lambda_{1,n+1}t} \quad (8)$$

同样

$$\Delta P_i = C_{i1} e^{\lambda_{1,t}} + \dots + C_{i(n+1)} e^{\lambda_{1,n+1}t} \quad (9)$$

式中: $e^{\lambda_{i,j}t}$ 与 $e^{\lambda_{j,i}t}$ ($i, j \neq n+1$) 为同一本地振荡模式; $e^{\lambda_{1,n+1}t}$ ($i = 1, \dots, n$) 为振荡的区间模式。又由式(3)可知, 式(8)(9)中的常数 C 取决于初始条件。显然在扰动发生前, G_1 和 G_i 同时向 G_{n+1} 侧系统输送功率, 因此 $C_{1(n+1)}$ 与 $C_{i(n+1)}$ 的符号必定相同。但由于 $\delta_{ij} = -\delta_{ji}$, 因此 C_{1i} 与 C_{i1} 的符号必定相反。

由以上分析可得出:

1) 在供电区域内施加的扰动会引起所在区域的本地振荡模式及区间振荡模式。机组输出电功率

的增量由本地模式振荡分量与区间模式分量共同组成。

2) 同一区域内不同机组输出电功率的区间模式分量符号相同, 而本地模式分量则符号相反。

3) 当相同供电区域内的若干机组并联在同一母线上, 则在母线连接处, 区间模式的幅值会得到增强, 而本地模式的幅值会被削弱。因此联络线通常会成为振幅较大的地方。

2 机电扰动的传播速度

长期以来, 人们普遍认为有功功率是以光速速率在电网中传播, 但在 1993 年 7 月研究人员通过同步相量测量装置观测美国西部电网 Texas 地区切除负荷后的机电动态响应后, 得出的结论却是机电扰动传播速度远低于光速。为从理论上得到机电扰动的传播速度, 文献[10-11]通过建立电力系统的连续体系统模型, 从波动理论这一崭新视角研究电力系统的机电暂态问题。文献[11]假定发电机转速接近于同步速、发电机的内阻抗极小以及忽略定子绕组电磁暂态等, 建立了 N 台发电机组成的链式电力系统模型。假设电力系统的连续体模型中参数是均匀分布的, 当发电机逐渐相互靠近, 相邻发电机的间距趋近于零时, 得到的从离散模型到连续体模型的机电波方程为

$$m \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + d \frac{\partial \theta}{\partial t} = b \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + 2\sqrt{gp_m} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (10)$$

式中 m 、 d 、 p_m 、 b 、 g 分别为连续体中按密度形式分布的发电机转子角动量、转子阻尼、机械功率、线路电纳及线路电导。

若连续体的参数均匀且为无限长, 忽略初始速度的影响, 式(10)的通解为

$$\theta(x, t) = \frac{1}{2} [e^{-\beta(v+v_0)t} f(x-vt) + e^{-\beta(v-v_0)t} f(x+vt)] \quad (11)$$

式中: $f(\cdot)$ 是相角增量的初始位移; $\beta = d/(2\sqrt{mb})$ 是阻尼率; $v_0 = \alpha = 2\sqrt{gp_m}/d$ 为临界波速, 决定变量 x 和 t 同时变化时相角增量的幅度增衰; $v = \sqrt{b/m}$ 为机电波的传播速度。

由 $v = \sqrt{b/m}$ 可知, 机电扰动的传播速度取决于线路电纳及发电机的转子角惯量。由于发电机的转子角惯量与发电机的转动惯量和转子角速度相关, 当线路参数和角频率一定时, 机电扰动的传播速度只与发电机的转动惯量相关。对于无并联发电机组的长距离输电线路, 由于其转动惯量近似为零, 其传播速率相当大, 甚至接近于光速速率。

3 仿真分析

3.1 振荡模式分析

为说明低频振荡的传播过程，本文以 IEEE 4 机 11 节点系统^[15]为例进行仿真研究。4 机 11 节点系统如图 2 所示。在未安装 PSS 情况下，测试系统的 3 种机电振荡模式，结果如表 1 所示。

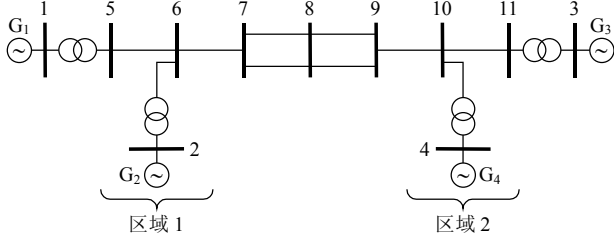


图 2 IEEE 4 机 11 节点系统
Fig. 2 IEEE 4-machine 11-node system

表 1 未安装 PSS 的机电模式

Tab. 1 Electromechanical modes without PSS

振荡模式	模式 1	模式 2	模式 3
频率/Hz	0.64	1.12	1.16

下面以在 G_1 处施加小扰动为例，分析机电扰动的传播特性。0.5 s 在机组 G_1 机端处施加小扰动，持续 0.5 s 后扰动消除。为观察波形的内含及实质，采用 Prony 方法对支路 5-6、2-6 及 6-7 处的有功功率波形进行分解，分解前后的波形如图 3 所示。将图 3(a)所示波形进行 Prony 分解后可以发现，它实际上是由一个本地模式分量和一个区间模式分量组成，如图 3(b)所示，其机电振荡模式如表 2 所示。

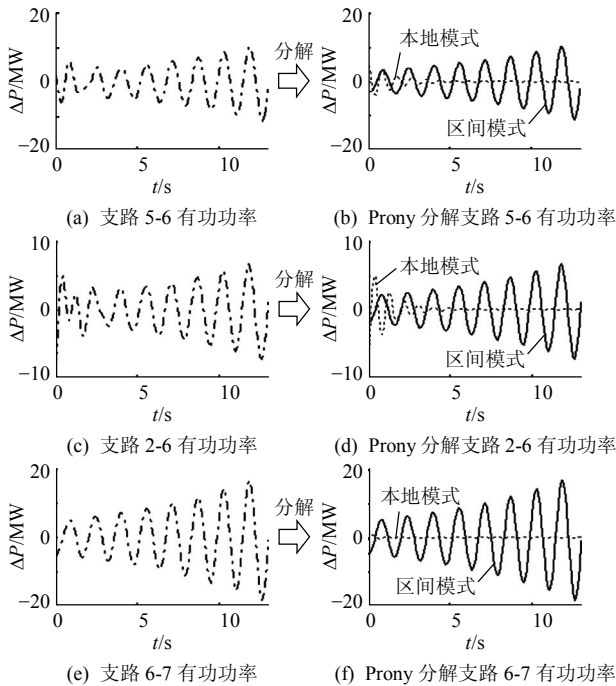


图 3 不同支路有功功率波形的 Prony 分解

Fig. 3 Prony analysis of active power wave at different branch

表 2 G_1 处扰动的机电模式

Tab. 2 Electromechanical modes with disturbance at G_1

振荡模式	特征值	频率/Hz	阻尼比
模式 1	$0.1080 \pm j4.0258$	0.6407	-0.0268
模式 2	$-0.6788 \pm j7.0460$	1.1214	0.0958

同样，图 3(c)所示波形也可被分解为一个本地模式和一个区间模式分量，见图 3(d)。仔细观察图 3(b)和 3(d)可以发现，其本地模式分量的初始位置恰好是反符号，这是由于 $\delta_{12} = -\delta_{21}$ 。而区间模式分量的初始位置则是同符号。将图 3(e)所示波形分解后可以发现，区间模式振幅得到了增强，而本地模式振幅却被削弱了，如图 3(f)所示。表 3 为 G_1 与 G_2 输出功率在不同支路上的振荡模式对比。模式 1 在支路 6-7 处的振幅为 $0.7188 + 0.4699 \approx 1.1761$ MW。同样模式 2 在支路 6-7 处的振幅 $1.5889 - 1.3664 \approx 0.2434$ MW。可见，支路 5-6 和支路 2-6 的机电扰动在母线 6 处汇集后本地模式振幅被削弱了，而区间模式振幅却得到了增强。

表 3 不同支路有功功率的机电振荡模式分析

Tab. 3 Electromechanical oscillation modes analysis of active power at different branch

支路	幅值/MW		频率/Hz	
	模式 1	模式 2	模式 1	模式 2
支路 5-6	0.7188	1.3664	0.6407	1.1214
支路 2-6	0.4699	1.5889	0.6407	1.1210
支路 6-7	1.1761	0.2434	0.6407	1.1196

3.2 机电扰动传播

由扰动的发电机功率增量方程可知，区域 1 内的扰动只会诱发区域 1 的本地模式及区间模式。但进一步对区域 2 的电功率进行 Prony 分析可以发现，其振荡模式中亦包含区域 1 的本地模式，只是其幅值要小很多，这显然不可能是区域 2 机组产生的振荡模式。表 4 为分别在 G_1 和 G_3 机端施加扰动后不同母线处的振荡幅值分析结果。从中可以发现，本地模式机电扰动会发生渗透传播。

由机电扰动传播的平均速度可知，机电扰动的传播速度与发电机转动惯量相关。为对其进行仿真验证，本文在联络线上母线 8、9 间并联一个转动惯量 $J=4$ 的发电机 G_5 ，通过对联络线母线间有功

表 4 不同母线处有功功率的机电模式分析

Tab. 4 Electromechanical oscillation modes analysis of active power at different bus

母线编号	G_1 处施加扰动		G_3 处施加扰动	
	模式 1 幅值/ MW	模式 2 幅值/ MW	模式 1 幅值/ MW	模式 2 幅值/ MW
母线 6	2.3969	0.4934	2.5210	0.0899
母线 7	3.5648	0.3058	3.7495	0.2005
母线 10	4.2130	0.2096	4.4291	0.7232

功率的相角分析可近似得出功率振荡的传播速度。本文对联络线上没有并联发电机和有并联发电机这2种情况进行对比,得到联络线上不同母线间的有功功率相角差,如表5所示。从中可以看出,当联络线上并联有发电机后,母线7、9两端有功功率的相角发生了很大变化。分析表明,当联络线上无并联发电机时,机电扰动是以接近光速的速率进行传播,而在并联发电机后,在联络线上的传播速度大致为6000 km/s。

表5 联络线上有功功率相角对比
Tab. 5 The phase-angle comparison of active power on tie-line

方式	母线7与8间功角差/(rad/s)	母线7与9间功角差/(rad/s)
并联G ₅ 前	0.000 1	0.000 2
并联G ₅ 后	0.000 1	0.229 4

事实上,在振荡未达到发电机G₅前,以及通过发电机G₅后,其传播速度依然接近光速,只是在经过G₅后相位发生了巨大变化。因此对于大互联系统,以平均速度指标衡量机电扰动的传播速度更为合理。文献[14]基于GPS系统得到机电扰动的平均速度一般为每s数百至数千km。

4 结论

由发电机输出电功率的增量方程可知,扰动会引起所在区域的若干本地模式及区间振荡模式。采用小扰动分析方法分析相连于同一母线不同支路的振荡输出响应可知,同一供电区域内不同机组相应的本地振荡模式,其符号相反,而区间模式的符号相同。因此在相连母线处,本地模式会被削弱,区间模式会得到增强。此外通过对联络线两端有功功率相角的对比,证实了机电扰动的平均传播速率与发电机转动惯量相关。机电扰动在整个互联系统中的平均传播速度远低于光速。

参考文献

- [1] 倪以信,陈寿孙. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:260-291.
- [2] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:365-409.
- [3] 王铁强,贺仁睦,王卫国,等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(2):21-25.
Wang Tieqiang, He Renmu, Wang Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25(in Chinese).
- [4] 赵书强,常鲜戎,贺仁睦. PSS控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):7-11.
Zhao Shuqiang, Chang Xianrong, He Renmu. Borrow damping phenomena and negative damping effect of PSS control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 7-11(in Chinese).
- [5] 邓集祥,涂进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别[J]. 电网技术,2007,31(7):36-41.
Deng Jixiang, Tu Jin, Chen Wuhui. Identification of critical low frequency oscillation mode in large disturbances[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 36-41(in Chinese).
- [6] 朱方,赵红光,刘增煌. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):1-7.
Zhu Fang, Zhao Hongguang, Liu Zenghuang. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7(in Chinese).
- [7] 苗友忠,汤涌,李丹. 局部振荡引起区间大功率振荡的机理[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):73-77.
Miao Youzhong, Tang Yong, Li Dan. Tentative study of inter-area large power oscillation mechanism caused by local mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 73-77(in Chinese).
- [8] 武诚,徐政,张静. 利用联络线功率相对相位判定低频振荡模式[J]. 中国电机工程学报,2009,29(10):36-40.
Wu Cheng, Xu Zheng, Zhang Jing. Low frequency oscillation mode determination based on relative phases of the tie-line active power[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 36-40(in Chinese).
- [9] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability[M]. US: IEEE Press, 1994: 46-93.
- [10] Thorp J S, Seyler C E, Phadke A G. Electromechanical wave propagation in large electric power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1998, 45(6): 614-622.
- [11] 王德林,王晓茹,James S Thorp. 电力系统的连续体系机电波模型[J]. 中国电机工程学报,2006,26(9):30-37.
Wang Delin, Wang Xiaoru, James S Thorp. Electromechanical wave continuum model for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 30-37(in Chinese).
- [12] 王德林,王晓茹. 电力系统连续体模型中机电波传播特性研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):43-48.
Wang Delin, Wang Xiaoru. Study on characteristics of electromechanical wave propagation in the continuum model for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 43-48(in Chinese).
- [13] 王德林,王晓茹. 电力系统中机电扰动的传播特性分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):18-24.
Wang Delin, Wang Xiaoru. Characteristic analysis of electromechanical disturbance propagation for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 18-24(in Chinese).
- [14] Parashar M, Thorp J S, Seyler C E. Continuum modeling of electromechanical dynamics in large-scale electric power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2004, 51(9): 1848-1858.
- [15] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2002:465-552.



郭成

收稿日期:2009-09-12.

作者简介:

郭成(1978—),男,博士研究生,主要从事电力系统稳定与控制研究工作,E-mail:gc325@126.com;

李群湛(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事供电理论、电能质量与控制研究工作;

王德林(1970—),男,博士,讲师,主要从事机电波、电力系统稳定与控制研究。

(责任编辑 王晔)