

电力系统的广义强迫振荡

鞠平¹, 刘咏飞¹, 王红印², 孙建华², 余一平¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 河南省电力公司 电力调度控制中心, 河南 郑州 450052)

摘要: 随着新能源发电和新型负荷的并网接入, 随机激励对电力系统的影响日渐突出, 且电力系统中振荡现象时有发生, 但由于不明原因而难以抑制。从频域的角度, 发现了电力系统在随机激励下的广义强迫振荡现象, 分析了广义强迫振荡产生机理。提出的广义强迫振荡理论指出: 如果输入随机激励功率谱频段能够覆盖电力系统中某些较弱阻尼模式频率, 就有可能引发较大的强迫振荡, 振荡中包含这些较弱阻尼模式频率分量。采用电流注入法, 在新英格兰 10 机 39 节点系统进行了计算分析, 结果验证了广义强迫振荡理论的正确性。所提广义强迫振荡理论是对传统狭义强迫振荡理论的突破。

关键词: 电力系统; 振荡; 强迫振荡; 随机激励; 功率谱密度; 模态分析

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.001

0 引言

在过去的几十年里, 世界各地电网陆续观测到许多振荡现象^[1-3], 其表现特征主要为等幅或增幅形式的振荡。振荡不但限制了系统区域间的功率传输能力, 而且严重威胁电力系统的安全稳定运行, 甚至有可能诱发连锁事故, 导致大面积停电等^[4-6]。因此, 加强对振荡的研究具有十分重要的意义。

同时, 大力发展新能源发电是国家战略, 风电、光伏、海洋能发电等相关产业快速发展。与传统的水力、火力发电方式相比, 新能源发电具有资源可再生、清洁环保等诸多优势^[7], 但是其强随机性^[8-9]也不可避免地成为了影响电网安全稳定的一个隐患。

对实际电网中出现的振荡现象^[10-12], 国内外学者通过理论分析和振荡复现, 对一些振荡的产生机理给出了合理的解释, 主要有弱阻尼机理、强迫振荡机理、混沌振荡机理等^[13-19], 并对不同的产生机理采取了相应的抑制措施。但从目前掌握的调查资料来看, 系统中未知机理的振荡现象仍时有发生, 难以抑制。联想到目前快速发展的新能源和新负荷并网可能带来的功率波动^[20-21], 随机激励能否引发电网中新的振荡现象、如何在保证新能源发电和新负荷正常运行的同时有效地分析和抑制可能出现的振荡现象等一系列问题, 值得深入探讨和研究。

本文从频域的角度, 发现了广义强迫振荡现象和机理, 并与传统的狭义强迫振荡进行对比。以新英格兰 10 机 39 节点系统为例, 基于电流注入法和频时变换法, 对广义强迫振荡理论进行仿真验证。

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013-CB228204); 国家自然科学基金资助项目(51137002, 51190102) Project supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228204) and the National Natural Science Foundation of China(51137002, 51190102)

1 狭义强迫振荡基本概念

传统的强迫振荡理论指出^[15]: 持续的周期性小扰动会引发电力系统强迫振荡, 当扰动频率等于或者接近系统自然振荡频率时, 会引起系统谐振, 导致大幅度的振荡, 或称为谐振机理的振荡。它具有起振快、起振后保持等幅振荡和失去扰动源后振荡很快衰减等特点。

以单机无穷大系统经典模型为例, 式(1)为线性化的发电机二阶转子摇摆方程, 并施加持续的正弦激励:

$$T_J \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d \Delta \delta}{dt} + K_S \Delta \delta = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

其中, $F_0 \sin \omega t$ 为持续的周期性小扰动, F_0 、 ω 分别为扰动幅值和频率; δ 、 T_J 、 D 、 K_S 分别为发电机功角、惯性时间常数、阻尼系数和同步转矩系数, 均为标么值。

经过推导可以求得系统强迫振荡的振幅为:

$$B = \frac{F_0 / K_S}{\sqrt{(1-v^2)^2 + (2\zeta v)^2}} \quad (2)$$

其中, $v = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$ 为外施扰动频率 f 与系统自然振荡频率 f_0 的比值; $\zeta = \frac{D}{2\omega_0 T_J}$ 为阻尼比。

由此可见, 在 $v=1$, 即 $f=f_0$, 并且阻尼比 ζ 较小的情况下, 对应式(2)中的振幅 B 将会很大, 此时系统发生大幅度振荡, 这种现象被称作“谐振”。

强迫振荡理论为传统的振荡机理分析提供了思路, 为采取合适措施抑制振荡提供了途径。但是该理论主要基于确定性的输入激励, 通过激励频率与系统弱阻尼模式频率之间点对点的对应关系得出结论。这种情况引发振荡的概率相对较小, 并不能很好地解释近期出现的一些振荡的原因, 同时也未能考虑到随机因素, 所以本文将传统的强迫振荡称为“狭义强迫振荡”。

2 广义强迫振荡机理分析

采用频域方式描述线性系统。设其频域传递函数为 $H(f)$, 输入平稳随机过程 u 的功率谱密度(PSD)为 $S_u(f)$, 输出平稳随机过程 y 的功率谱密度为 $S_y(f)$, 根据线性系统理论则有^[22]:

$$S_y(f) = |H(f)|^2 S_u(f) \quad (3)$$

由此可见, 在某个频率或者频段上, 只有当 $|H(f)|^2$ 和 $S_u(f)$ 都大时, $S_y(f)$ 才会大; 当 $|H(f)|^2$ 和 $S_u(f)$ 中有一个为 0 或者很小时, $S_y(f)$ 就为 0 或者很小。下面来分析 $|H(f)|^2$ 在什么情况下会大。

设 $H(f)$ 所对应的拉氏传递函数为 $G(s)$, 设其 n 个极点为 λ_i , m 个零点为 β_j , 则有:

$$G(s) = \frac{C(s)}{D(s)} = \frac{\alpha \prod_{j=1}^m (s - \beta_j)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)} \quad (4)$$

设某个振荡模式对应一对共轭复根:

$$\lambda_i = -\sigma_i \pm j2\pi f_{\omega i} \quad (5)$$

传递函数中与此相对应的部分记为:

$$Z_{\omega i}(s) = \frac{1}{[s - (-\sigma_i + j2\pi f_{\omega i})][s - (-\sigma_i - j2\pi f_{\omega i})]} \quad (6)$$

$$H_{\omega i}(f) = Z_{\omega i}(j2\pi f) = \frac{1}{(j2\pi f + \sigma_i - j2\pi f_{\omega i})(j2\pi f + \sigma_i + j2\pi f_{\omega i})} = \frac{1}{4\pi^2(f_{\omega i}^2 - f^2) + \sigma_i(\sigma_i + j4\pi f)} \quad (7)$$

如果 $f = f_{\omega i}$, 则有:

$$|H_{\omega i}(f_{\omega i})|^2 = \frac{1}{\sigma_i^2(\sigma_i^2 + 16\pi^2 f_{\omega i}^2)} \quad (8)$$

如果该模式具有较弱阻尼, 即 σ_i 较小, 则 $|H_{\omega i}(f_{\omega i})|^2$ 就很大。以算例系统中模式 9 为例, 其 $|H_{\omega i}(f)|^2$ 如图 1 所示。

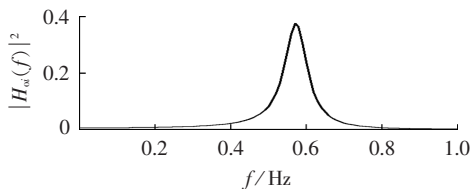


图 1 某个模式幅频特性平方

Fig.1 Squared amplitude-frequency characteristic of an oscillation mode

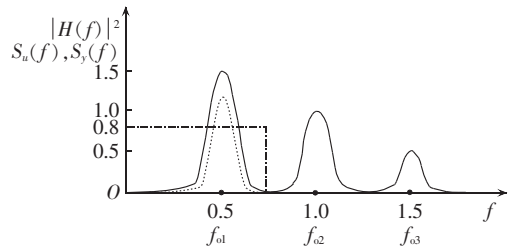
由此可见, $|H_{\omega i}(f)|^2$ 在较弱阻尼模式频率 $f_{\omega i}$ 附近具有一个尖波。即在 $f_{\omega i}$ 附近, $|H_{\omega i}(f)|^2$ 很大, 而在远离 $f_{\omega i}$ 的其他频段, $|H_{\omega i}(f)|^2$ 则很小。

如果这样的模式有 I 个, 则这 I 个模式对应的幅频特性是乘积关系:

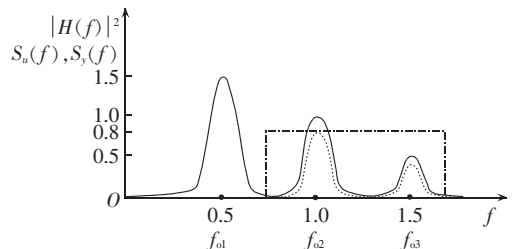
$$|H(f)|^2 = |C|^2 \prod_{i=1}^I |H_{\omega i}(f)|^2 \quad (9)$$

即幅频特性在 I 个模式频率附近, 都具有一个尖波,

示意图如图 2 中实线所示。



(a) 输入-输出示意图 1



(b) 输入-输出示意图 2

图 2 广义强迫振荡机理图

Fig.2 Mechanism of general forced oscillations

如果在某些较弱阻尼模式频率对应的频段上, 有某些输入随机激励具有较大的功率谱幅值, 如图 2(a) 中点划线所示。根据式(3), 相乘以后所得输出变量功率谱(如图中虚线)就大, 比如图 2(a) 中较弱阻尼模式 f_{01} ; 反之, 如果在某些较弱阻尼模式频率对应的频段上, 输入随机激励的功率谱小, 则该频段输出变量的功率谱就小, 如图 2(a) 中较弱阻尼模式 f_{02} 和 f_{03} 。但如果输入随机激励的功率谱频段发生变化, 如图 2(b) 所示, 输出变量功率谱在较弱阻尼模式 f_{01} 处小, 而在较弱阻尼模式 f_{02} 和 f_{03} 处则大。

即如果有某些输入随机激励功率谱频段能够覆盖某些较弱阻尼模式频率, 就有可能引发较大的振荡, 振荡中包含这些较弱阻尼模式频率分量。

需要特别指出的是, 狭义强迫振荡条件是假设振荡源是单频, 而且振荡源频率恰好等于或者约等于自然振荡频率, 这种情况发生的可能性小。而本文发现的随机激励引发振荡的条件, 只需要某些随机激励功率谱频段能够覆盖某些较弱阻尼模式频率, 这种情况发生的可能性就显著增加。这有可能解释为什么近期电力系统中一些振荡属于强迫振荡, 却又找不到振荡原因, 也有可能解释为什么近期电力系统振荡增多。

由于随机激励引发的振荡属于强迫振荡, 但又显著扩大了狭义强迫振荡的范围, 所以本文将随机激励引发的振荡称之为“广义强迫振荡”。

3 广义强迫振荡计算分析

3.1 计算方法

首先, 根据输入随机激励的功率谱, 通过频时变

换^[20-22],可以获得对应的时域随机波动曲线。

然后,基于电力系统分析综合程序(PSASP)用户程序接口(UIP)环境,使 PSASP 和用户程序(UP)模块联合运行,共同完成计算任务,如图 3 所示。通过 UIP 模块,本文将随机波动的功率源模型以等效电流注入的形式参与系统时域仿真,从而实现对外部随机激励的模拟。在混合仿真计算的过程中,利用 PSASP 与 UP 间的数据交互,基于电路原理,将随机功率波动数据转换为时变电流数据,转换公式如下:

$$\begin{cases} I_r = (P \cos \theta + Q \sin \theta) / U \\ I_i = (P \sin \theta - Q \cos \theta) / U \end{cases} \quad (10)$$

其中, I_r 和 I_i 分别为等效电流实部和虚部; P 和 Q 分别为随机波动的有功和无功功率; U 和 θ 分别为从仿真系统中导出的注入母线电压和相角。

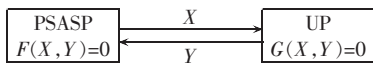


图 3 PSASP 与 UP 连接关系

Fig.3 Relationship of PSASP and UP

在获得了相应的等效电流后,将其注入相应的母线节点进行数值计算,具体流程请见相关文献^[23]。由此获得输出变量的时域响应,再通过时频变换^[20-22]即可获得输出变量的功率谱。

3.2 算例系统

算例系统为新英格兰 10 机 39 节点系统,如图 4 所示。由于 G_{10} 是外网等效机,其惯性时间常数很大,因此选取 G_{10} 为参考机。

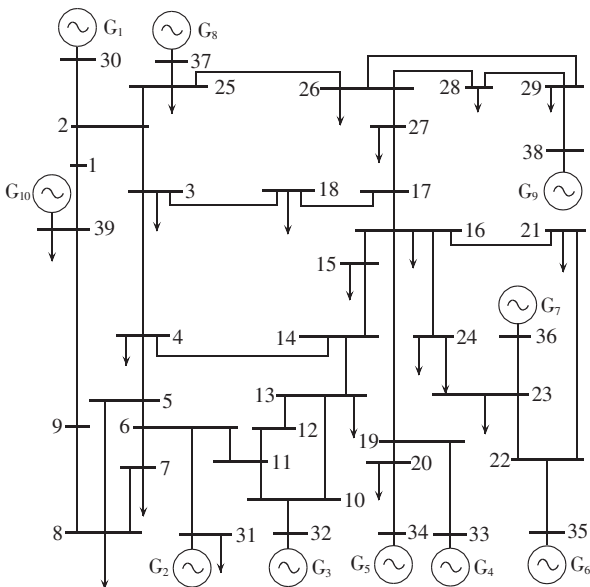


图 4 算例系统图

Fig.4 Simulation system scheme

3.3 模态分析结果

算例系统中,发电机采用 5 阶详细模型,负荷采用恒阻抗模型。利用 PSASP 中的小干扰分析模块,可以获得该系统的 9 个机电振荡模式及其主要参与

机组,如表 1、表 2 所示。由表 1 可见,9 个模式的频率均属于低频振荡范围^[6]。另外,表 2 中各机组参与各振荡模式的程度在“<->”符号两端分别按从左至右递减排列,相关因子小的机组没有列入。

表 1 系统振荡模式

Tab.1 Oscillation modes of simulation system

振荡模式	频率/Hz	阻尼比/%	振荡模式	频率/Hz	阻尼比/%
1	1.466892	6.0419	6	1.137658	4.8310
2	1.456350	5.2050	7	1.000131	4.2776
3	1.447361	4.1513	8	0.904576	4.5232
4	1.201765	3.4492	9	0.573959	6.2630
5	1.191107	4.9570			

表 2 系统振荡模式主要参与机组

Tab.2 Major participant generators in oscillation modes

振荡模式	参与机组
1	$G_4 <-> G_5$
2	$G_7 <-> G_6$
3	$G_8 <-> G_1$
4	$G_1, G_8 <-> G_9, G_3, G_6, G_7$
5	$G_2 <-> G_3$
6	$G_5, G_4 <-> G_6, G_7$
7	$G_2, G_5 <-> G_3, G_6, G_4, G_7$
8	$G_9 <-> G_5, G_6, G_3, G_4, G_7, G_2$
9	$G_{10} <-> G_9, G_6, G_5, G_4, G_7, G_3, G_2, G_1, G_8$

3.4 狭义强迫振荡计算结果

模态分析表明, G_5 参与 5 个机电振荡模式,分别是模式 1、6、7、8、9,并且参与度均较大,便于进行对比分析。因此,等效电流注入点选在连接 G_5 的节点 34,用以模拟发电机有功出力的随机波动。算例中 G_5 有功出力为 5.08 p.u. (508 MW),在该节点分别注入频率为 1.14 Hz (对应模式 6) 和 1.3 Hz (不对应任何模式)、幅值为 0.05 p.u. 的正弦功率波动,输出 G_5 相对 G_{10} 功角功率谱进行对比,所得结果见图 5。

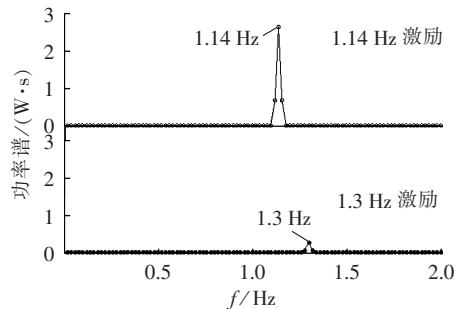


图 5 正弦激励下 G_5 相对功角功率谱

Fig.5 PSD of relative angle under sinusoidal excitation

由图 5 可见,单频正弦激励能够引起系统功角发生与激励相同频率的强迫振荡,并且频率为 1.14 Hz 的正弦激励引起的系统功角振荡幅值远大于频率为 1.3 Hz 情况下的振荡幅值。上述结果以及其余机组相对功角的功率谱分析表明:

- a. 若正弦激励的频率约等于系统振荡模式频

率,则该模式被激发而出现大幅振荡,参与该模式机组的功率谱幅值明显大于未参与机组;

b. 若正弦激励的频率与系统振荡模式频率差距较大,则出现小幅强迫振荡;

c. 距激励源较近机组振荡相对大,较远机组振荡相对小。

3.5 广义强迫振荡计算结果

从模态分析表 2 中可以看出, G_5 参与的 5 个振荡模式频率范围在 0.5~1.5 Hz 之间。根据第 2 节广义强迫振荡理论,若随机激励功率谱频段能够覆盖系统某些振荡模式频率,就会激发系统在该模式频率下的振荡。为了验证这一理论,首先假设随机激励功率谱频段在 0~3 Hz 之间,其余频段幅值为 0,这样就覆盖了 G_5 参与的 5 个振荡模式频率。其次,为了便于和狭义强迫振荡计算结果进行对比,将功率谱幅值与单频正弦激励功率谱幅值保持一致。然后,根据频时变换法,获取随机激励的时域序列,如图 6 所示,图中功率为标么值,后同。

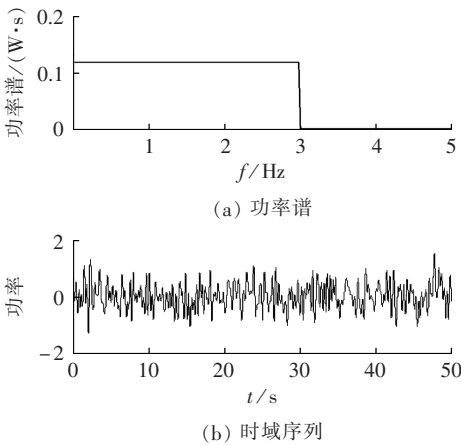


图 6 随机激励功率谱和时域序列

Fig.6 PSD and corresponding time-domain sequences of random excitation

其后,将频时变换后的随机激励时域序列注入算例系统,注入点仍选取节点 34,输出变量选为 G_5 相对 G_{10} 的功角以及节点 16 和 19 之间联络线的有功功率,在获得时域曲线后进行功率谱分析,所得结果如图 7 和图 8 所示。

由图可见,随机激励会激发出强迫低频振荡。从图 7 中标出的功率谱峰值频率可以看出,当随机激励功率谱频段覆盖 G_5 参与的 5 个振荡模式频率时,能够从 G_5 相对功角功率谱中观测到对应频率的 5 个尖峰。从图 8 中区域联络线有功功率结果来看,能够观察到 4 个尖峰但缺少模式 1。分析表明模式 1 是 G_4 和 G_5 之间的局部振荡模式,而联络线在 G_4 和 G_5 之外,故模式 1 未能在联络线功率谱中观测到。

需要说明的是,由于算例系统的非线性以及数值计算误差等原因,图 7 和图 8 中功率谱峰值频率

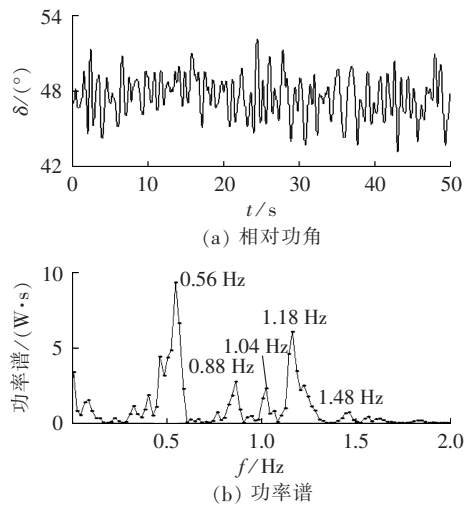


图 7 宽频段随机激励下 G_5 相对功角及其功率谱
Fig.7 Relative angle under random excitation and its PSD

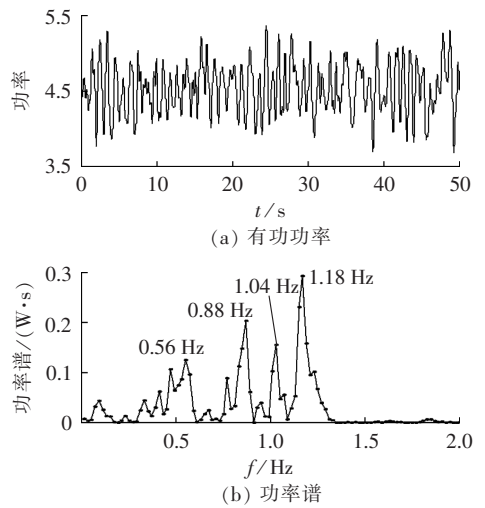


图 8 宽频段随机激励下区域联络线有功功率及其功率谱
Fig.8 Active power on area tie-line under random excitation and its PSD

与系统振荡模式频率略有偏差但不大。总之,通过计算各机组相对功角功率谱进行验证,能够得出结论: G_5 参与的 5 个振荡模式均被激发,而 G_5 未参与的 4 个振荡模式均未被激发。

为了进一步验证广义强迫振荡理论,将全频段随机激励分为 2 个窄频段,针对 G_5 参与的 5 个振荡模式有选择地进行激发。假设原随机激励在 0.4~0.7 Hz 和 1.1~1.4 Hz 这 2 个频段功率谱幅值不变,其余频段幅值变为 0,如图 9 所示。为了更加符合实

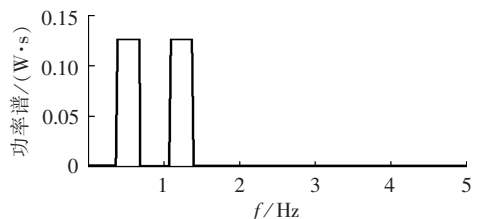


图 9 两频段随机激励功率谱

Fig.9 PSD of two-segment random excitation

际电网出现的随机功率波动,将低频段随机激励注入点选在连接 G_5 的节点 34,模拟发电机有功出力的慢变随机波动;而高频段随机激励注入点选在与 G_5 电气距离最近的负荷节点 20,模拟负荷的快变随机波动。在发电机功率和负荷功率的随机激励下,所得 G_5 相对功角的功率谱如图 10 所示,联络线 16-19 有功功率的功率谱如图 11 所示。

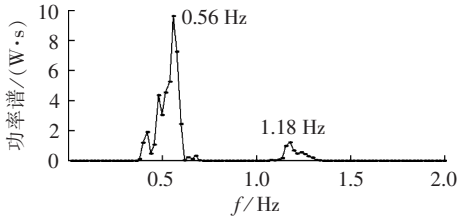


图 10 两频段随机激励下 G_5 相对功角功率谱
Fig.10 PSD of relative angle under two-segment random excitation

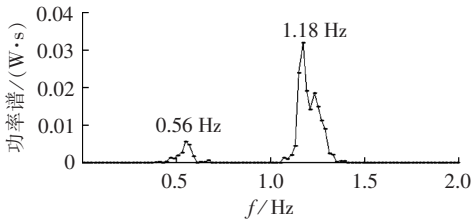


图 11 两频段随机激励下区域联络线有功功率功率谱
Fig.11 PSD of active power on area tie-line under two-segment random excitation

从模态分析结果中可以看到,两频段随机激励的功率谱仅覆盖了 G_5 参与的模式 6 和模式 9 的对应频率。从图 10、图 11 也只观测到 2 个尖峰,其峰值频率分别对应模式 6 和模式 9,而模式 1、7、8 则没有观测到。由此可以得出结论,当随机激励的功率谱未能覆盖某振荡模式对应频率时,该模式不会被激发。这进一步验证了本文广义强迫振荡理论的正确性。除此之外,通过图 10、图 11 结果对比可以看出,不仅发电机有功出力的随机波动会引起系统强迫振荡,与发电机电气距离较近的负荷功率随机波动也有可能对系统振荡产生影响,并且激励源与观测点位置的电气距离越近,影响就越大。

4 结论

本文从频域角度发现了随机激励引发的广义强迫振荡。从理论分析和计算分析证明:如果输入随机激励功率谱频段能够覆盖系统某些较弱阻尼模式频率,就有可能引发较大的强迫振荡,输出振荡中包含这些较弱阻尼模式频率分量。

相比于狭义强迫振荡理论在频率上的“点对点”相等,广义强迫振荡理论中“面对点”的激发条件显著增加了系统出现振荡的可能性。这有可能解释为什么近期电力系统中一些振荡属于强迫振荡却找

不到振荡原因,也有可能解释近期电力系统振荡增多的原因。

参考文献:

- [1] 王梅义. 大电网事故分析与技术应用[M]. 北京:中国电力出版社,2008:20-98.
- [2] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术,2003,27(9):2-6.
HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North American Power Grid[J]. Power System Technology,2003,27(9):2-6.
- [3] EPRI Report TR108256. System disturbance stability studies for Western System Coordinating Council(WSCC)[R]. [S.L.]:PowerTech Labs Inc,1997.
- [4] ROGERS G. Power system oscillations[M]. New York,USA:Kluwer Academic Publishers,2000:25-70.
- [5] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 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,et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(1):1-7.
- [6] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:260-290.
- [7] 李亚楼,周孝信,林集明,等. 2008 年 IEEE PES 学术会议新能源发电部分综述[J]. 电网技术,2008,32(20):1-7.
LI Yalou,ZHOU Xiaoxin,LIN Jiming,et al. A review of new energy power generation part in 2008 IEEE PES general meeting [J]. Power System Technology,2008,32(20):1-7.
- [8] 张建勇,鞠平,余一平,等. 电力系统在高斯随机小激励下的响应及稳定性[J]. 中国科学:技术科学,2012,55(7):1873-1880.
ZHANG Jianyong,JU Ping,YU Yiping,et al. Responses and stability of power system under small gauss type random excitation [J]. Sci China Tech Sci,2012,55(7):1873-1880.
- [9] 鞠平,秦川,黄桦,等. 面向智能电网的建模研究展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):1-6.
JU Ping,QIN Chuan,HUANG Hua,et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid. automation of electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(11):1-6.
- [10] 李丹,苏为民,张晶,等. “9.1”内蒙古西部电网振荡的仿真研究 [J]. 电网技术,2006,30(6):41-47.
LI Dan,SU Weimin,ZHANG Jing,et al. Simulation study on west inner mongoli a power grid oscillations occurred on September 1st,2005[J]. Power System Technology,2006,30(6): 41-47.
- [11] 苗友忠,汤涌,李丹,等. 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,et al. Tentative study of inter-area large power oscillation mechanism caused by the local mode[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(10):73-77.
- [12] 鞠平,谢欢,孟远景,等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报,2005,25(22):56-60.
JU Ping,XIE Huan,MENG Yuanjing,et al. Online identification of low-frequency oscillation based on wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(22):56-60.
- [13] DEMELLO F. Concepts of synchronous machine stability as

- affected by excitation control[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4):316-329.
- [14] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰, 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, XU Dongjie, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2):21-25.
- [15] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术, 2006, 30(10):29-33.
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10):29-33.
- [16] 王康, 金宇清, 甘德强, 等. 电力系统小信号稳定分析与控制综述[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5):10-19.
WANG Kang, JIN Yuqing, GAN Deqiang, et al. Survey of power system small signal stability and control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5):10-19.
- [17] 黄涌, 云雷, 唐飞, 等. 电力系统强迫功率振荡过程中的功-能转换[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8):41-46.
HUANG Yong, YUN Lei, TANG Fei, et al. Work-energy transformation during forced power oscillation of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8):41-46.
- [18] 王娜娜, 廖清芬, 唐飞, 等. 基于割集能量及灵敏度的强迫功率振荡扰动源识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1):75-80.
WANG Nana, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Disturbance source identification based on cutset energy and sensitivity for forced power oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1):75-80.
- [19] 徐伟, 鲍颜红, 徐泰山. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5):98-101.
XU Wei, BAO Yanhong, XU Taishan. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):98-101.
- [20] 林今, 孙元章, SØRENSEN P, 等. 基于频域的风电场功率波动仿真:(一)模型及分析技术[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4):65-69.
LIN Jin, SUN Yuanzhang, SØRENSEN P, et al. Simulation of power fluctuation of wind farms based on frequency domain: part one model and analysis technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4):65-69.
- [21] 林今, 孙元章, SØRENSEN P, 等. 基于频域的风电场功率波动仿真:(二)变换算法及简化技术[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5):71-76.
LIN Jin, SUN Yuanzhang, SØRENSEN P, et al. Simulation of power fluctuation of wind farms based on frequency domain: part two transformation algorithm and model simplification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5):71-76.
- [22] NEWLAND D E. An introduction to random vibrations:spectral & wavelet analysis[M]. 3rd ed. New York, USA:Longman Inc, 1993:67-79.
- [23] 陈大宣, 余一平, 鞠平, 等. 基于时变电流注入方法的特殊电力负荷建模研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3):120-124.
CHEN Daxuan, YU Yiping, JU Ping, et al. Modeling of special power load based on time-varying current injection method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3):120-124.

作者简介:



鞠平

鞠平(1962-),男,江苏靖江人,副校长,教授,博士研究生导师,博士,通讯作者,主要研究方向为电力系统建模与控制(E-mail: pju@hhu.edu.cn);

刘咏飞(1990-),男,江苏靖江人,博士研究生,主要研究方向为多随机因素作用下电力系统动态响应计算与分析(E-mail: lyfsm@163.com);

王红印(1963-),男,江苏常州人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统运行分析(E-mail: wanghongyin2009@hotmail.com)。

General forced oscillations of power systems

JU Ping¹, LIU Yongfei¹, WANG Hongyin², SUN Jianhua², YU Yiping¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Electric Power Dispatching & Controlling Center, Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: With the increasing integration of renewable generation and new loads into power systems, the dynamics of power systems under random excitation is receiving increasing concern. Meanwhile, lots of oscillations occasionally occur in interconnected power systems, which are difficult to explain and control. From the viewpoint of frequency domain, the mechanism and fundamental theory of general forced oscillation in power systems are developed. It proves that the general forced oscillations may be caused when the frequency bands, observed in the power spectral density of random excitation, can cover the inherent frequencies of some weaker damp modes in the power system, and the general forced oscillation contains all frequency components of these modes. This new theory is verified by digital simulation in the 10-generator, 39-bus New England Test System. The general forced oscillation theory breaks through the special forced oscillation theory.

Key words: electric power systems; oscillation; forced oscillation; random excitation; power spectral density; mode analysis