

基于割集能量及灵敏度的强迫功率振荡扰动源识别

王娜娜^{1,2}, 廖清芬¹, 唐 飞¹, 李文锋³

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中南电力设计院, 湖北 武汉 430071;
3. 中国电力科学研究院系统所, 北京 100085)

摘要: 电力系统中持续周期性的小扰动可能引起联络线大幅度强迫功率振荡, 扰动源很难发现和捕捉。提出基于割集能量及灵敏度的强迫功率振荡扰动源识别方法。该方法基于强迫功率振荡的能量转换特性提出割集能量的概念, 根据割集能量的流向进行扰动源识别, 并通过割集能量对发电机有功出力的归一化灵敏度分析确定出关键控制机组。8 机系统算例和华中电网算例均验证了该方法的正确性和实用性。割集能量法可借助广域测量系统提供的网络动态信息在线识别强迫功率振荡扰动源所在的割集, 适用于广域系统中原动机功率扰动和负荷扰动下强迫功率振荡扰动源的准确定位。

关键词: 电力系统; 广域系统; 强迫功率振荡; 割集能量; 灵敏度分析; 扰动源识别

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.014

0 引言

近年来, 我国电力系统发生了常规负阻尼低频振荡理论尚不能解释的振荡现象, 这些振荡发生时系统主导振荡模式的阻尼较好, 强迫振荡理论可给予较好的解释。该理论认为, 当系统受到持续的周期性功率扰动时会引起大幅度的功率振荡, 扰动频率接近系统功率振荡的固有频率时振荡幅值最大, 扰动所引起的响应不仅与电力系统本身的特性有关, 也与扰动的变化规律有关^[1]。

共振机理低频振荡的发生, 关键在于扰动源的存在, 因此扰动源的寻找和分析至关重要。文献[2]基于复模态方法分析了多机系统强迫功率振荡的稳态响应特性, 发现强迫功率振荡与弱阻尼自由振荡很难区分, 仅通过振荡幅值、相位信息难以识别扰动源; 势能在一定程度上能反映电力系统动态特征^[3-6], 关注系统能量变化特点, 对于系统中扰动源的辨识具有重要意义^[7-10]。文献[8]将能量转换特性初步应用到仿真系统强迫功率振荡扰动源识别中, 但仅就 10 机 39 节点算例进行了说明, 并未在实际系统中进行分析验证。灵敏度分析是研究与分析某系统(或模型)的状态或输出变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度的有效方法, 文献[12-16]将其有效用于电力系统稳定控制中。

鉴于此, 本文提出了基于割集能量及灵敏度的

强迫功率振荡扰动源识别方法。该方法基于强迫功率振荡的能量转换特性提出割集能量的概念, 根据割集能量的流向进行扰动源识别, 并通过割集能量对发电机有功出力的归一化灵敏度分析确定出关键控制机组。8 机系统算例和华中电网算例均验证了其正确性和实用性。

1 强迫功率振荡的能量转换特性

采用单机无穷大系统分析强迫功率振荡能量转换特性。发电机采用经典二阶模型, 其转子运动方程为:

$$\begin{cases} M \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_e - D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_T 为恒定机械功率; P_e 为电磁功率; D 为定常阻尼系数, 主要计及 d, q 绕组在动态过程中的阻尼作用和转子机械阻尼。

在工作点线性化, 有:

$$\begin{cases} M \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_T - \Delta P_e - D\Delta\omega \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)进行首次积分得:

$$\int_0^t M\Delta\omega dt + \int_0^t \Delta P_e \Delta\omega dt = \int_0^t \Delta P_T \Delta\omega dt - \int_0^t D\Delta\omega \Delta\omega dt \quad (3)$$

其中, ΔP_T 为原动机扰动功率。

式(3)中, 等号左边第 1 项为发电机动能 ΔE_{KE} , 第 2 项为发电机势能 ΔE_{PE} ; 等号右边第 1 项为外施扰动注入能量 ΔE_T , 第 2 项为发电机和网络阻尼共同耗散的能量阻尼耗散能量 ΔE_D 。

收稿日期: 2011-09-01; 修回日期: 2012-12-16
基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG029-2012); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA-05A119)
Project supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG029-2012) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A119)

共振稳态时,各状态量都以与扰动同频率的形式变化。设 $\Delta P_T = \Delta P_{Tm} \sin \omega t$, 扰动频率大小为 ω , 若系统固有振荡频率为 ω_n , $v = \omega/\omega_n$ 为频率比, 则转子角偏差稳态解为 $\Delta \delta = \Delta \delta_m \sin(\omega t - \varphi_\delta)$, 电磁功率变化量 $\Delta P_e = K_s \Delta \delta$, 转速偏差 $\Delta \omega = \Delta \dot{\delta}/\omega_0$ 。将上述 $\Delta \delta$ 、 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 稳态解代入式(3), 可得系统净能量为:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta E_T + \Delta E_D = \Delta E_{PE} + \Delta E_{KE} = \\ &= \frac{K_s \Delta \delta_m \Delta \omega \sin(2\omega t - 2\varphi_\delta)}{2} - \\ &= \frac{M \Delta \omega^2 \omega \sin(2\omega t - 2\varphi_\delta)}{2} = \\ &= \frac{M \omega_n^2 \Delta \omega^2 \omega \sin(2\omega t - 2\varphi_\delta)}{2} (1 - v^2) \end{aligned} \quad (4)$$

共振时 $v \approx 1$, 故 $\Delta E_T = -\Delta E_D$, $\Delta E_{PE} = -\Delta E_{KE}$, 即强迫功率振荡共振稳态时, 系统外施扰动注入功率等于阻尼耗散功率, 也即扰动注入的能量与阻尼耗散的能量相等, 动能和势能完全转换。

强迫功率振荡本质是电力系统机电振荡, 原动机功率扰动和负荷扰动是引起电网联络线功率波动的 2 种常见扰动形式。由电力系统低频振荡共振机理可知, 发电机转子是共振发生的主要环节, 考察不同功率扰动对电网功率振荡的影响, 都要归结到发电机转子。原动机作为发电机的输入能量源, 直接作用于转子, 它是主动和集中的; 负荷是能量消耗源, 通常远离发电机并且分布在电网的各处, 它是间接和分散的, 但负荷的波动通过改变发电机定子输出有功功率, 间接引起发电机转速的变化; 周期性负荷扰动造成发电机电磁功率存在与负荷扰动同步的持续周期分量, 等效于对发电机施加一个与周期性负荷扰动同步的强迫项。所以, 尽管 2 种扰动性质存在差异, 但其本质均纯属电网的功率波动, 故线性化模型亦适用于负荷扰动下强迫功率振荡的理论分析。

2 强迫功率振荡扰动源的识别

结合强迫功率振荡的能量转换特性, 提出基于割集能量及灵敏度的强迫功率振荡扰动源识别方法, 实现流程如图 1 所示, 其中割集能量 E_E 和割集能量对发电机有功输出的归一化灵敏度算法如下。

2.1 割集能量算法

线性化系统支路 L_{k-j} i 端和 j 端势能函数分别为:

$$\Delta E_{PEi}(t) = \int_0^t \Delta P_{ij} \Delta \phi_i d\tau \quad (5)$$

$$\Delta E_{PEj}(t) = \int_0^t \Delta P_{ji} \Delta \phi_j d\tau \quad (6)$$

其中, $\Delta \phi = [\Delta \delta^T, \Delta \theta^T]^T$ 为所有节点相角偏移。

图 2 所示的电网络中, 由 (a, e, d, f) 构成的割集 Ω 的割集能量 E_E 为:

$$E_E = \Delta E_{PEa} + \Delta E_{PEe} + \Delta E_{PEd} + \Delta E_{PEf} \quad (7)$$

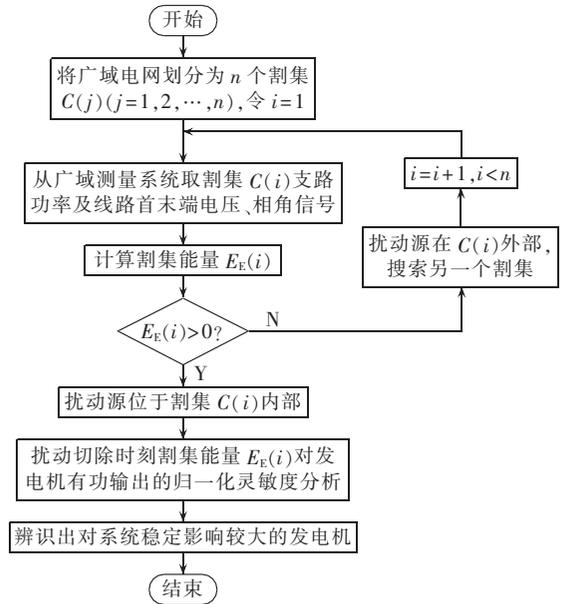


图 1 基于割集能量扰动源识别流程图

Fig.1 Flowchart of disturbance source identification based on cutset energy

根据强迫功率振荡能量转化特点, 扰动必然伴随着能量的注入, 注入的能量以支路势能的形式在网络中传播, 最后由于系统阻尼作用被耗散。所以, 若扰动源位于割集内部, 必有势能流出割集; 若扰动源位于割集外部, 流入割集的势能应该略大于流出割集的势能, 其差值为割集内部发电机和支路阻尼损耗, 大小

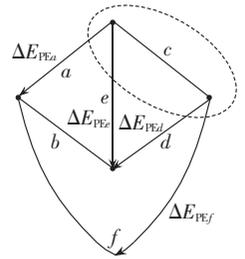


图 2 割集能量示意图

Fig.2 Schematic diagram of cutset energy

取决于割集本身及系统的潮流方式。为方便分析, 定义网络中流出割集的势能为正, 流入割集的势能为负。若割集能量为正值, 扰动源应位于割集内部; 若割集能量为略小于 0 的负值, 扰动源位于割集外部。

2.2 归一化灵敏度算法

归一化灵敏度适用于比较分析参数的相对变化对网络特性的影响。系统割集能量 E_E 对发电机 G_i 有功出力 P_{Gi} 的归一化灵敏度描述为:

$$S_{P_{Gi}}^{E_E} = \lim_{\Delta P_{Gi} \rightarrow 0} \frac{\Delta E_E / E_E}{\Delta P_{Gi} / P_{Gi}} = \frac{\Delta E_E \%}{\Delta P_{Gi} \%} \quad (8)$$

式(8)中, 分子为割集能量的变化百分率, 分母为发电机 G_i 的有功出力变化百分率, 故归一化灵敏度为无量纲的常数, 其物理意义为发电机 G_i 可调节点的有功出力增加单位相对变化量时, 割集能量的相对变化量。由于 E_E 和 P_{Gi} 均为时变量, 将式(8)描述为时域形式:

$$S_{P_{Gi}}^{E_E}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[E_E(t + \Delta t) - E_E(t)] / E_E(t)}{[P_{Gi}(t + \Delta t) - P_{Gi}(t)] / P_{Gi}(t)} \quad (9)$$

由于扰动过程中灵敏度的变化不稳定,不同时段同一台发电机对割集能量的影响有较大差异,而扰动切除后,灵敏度的变化趋势比较平稳,借鉴暂态分析中将故障切除时刻的相关变量作为暂态稳定指标,本文将扰动切除时刻割集能量对发电机有功出力的归一化灵敏度作为关键控制机组辨识的依据。

当 t 为扰动切除时刻,式(9)即为扰动切除时刻割集能量对 G_i 有功出力的归一化灵敏度,其值可正可负。灵敏度的绝对值越大,割集能量对 G_i 有功输出的变化越敏感, G_i 对系统稳定贡献越大,为关键控制机组。灵敏度为正值,说明割集能量的变化与 G_i 有功输出的变化呈正相关, G_i 可调节节点为减出力节点;为负值,说明两者呈负相关, G_i 节点为增出力节点。实际应用中,应先对灵敏度绝对值较大的发电机采取措施,以快速抑制系统振荡。

3 算例分析

3.1 8 机系统算例

在中国电力科学院 8 机系统算例中验证割集能量法在多机系统强迫功率振荡扰动源识别中的正确性。Q-R 特征值分析得到 8 机系统固有区间模式为 $-0.05487 \pm j4.885371$,振荡频率为 0.78 Hz,故扰动角频率设为 4.8984 rad/s,采用下面 2 种扰动方式。

a. 对发电机 G_8 施加原动机功率周期性扰动: $\Delta P_1 = 0.5 \sin(4.8984t)$ p.u., 扰动时间为 1~10 s。

b. 对节点 29 施加负荷周期性扰动: $\Delta P_L = 0.5 \sin(4.8984t)$ p.u., 扰动时间为 1~10 s。

系统基准容量为 100 MV·A。图 3 为系数割集示意图,观测其割集能量:割集 1 为(30-31,31-33);割集 2 为(30-31,33-34);割集 3 为(30-31,16-29)。

由于割集 1、2 事实上为同一割集,所以 2 种扰动下,两者的割集能量均是重叠的,如图 4、5 所示。 G_8 施加原动机周期性功率扰动时,3 个割集的能量均为正值,说明有能量流出,即扰动均位于割集内部;负荷节点 29 下施加周期性负荷扰动时,割集 3 的能量为正值,割集 1、2 的能量为略小于 0 的负值,说明扰动位于割集 3 的内部,割集 1、2 的外部。以上分析结果均与实际情况相符,说明割集能量法可以实现原动机功率扰动和负荷扰动下扰动源的准确定位。

选取 G_8 施加原动机周期性功率扰动情况,计算扰动切除时刻各割集能量对每台发电机有功出力的归一化灵敏度,结果列于表 1 中(表中,额定有功出力为标么值)。根据系统的基础数据库,发电机 G_2 、 G_4 和 G_5 的调速器均采用 PSASP 自带模型 1 的第 1 组参数,发电机 G_3 、 G_7 和 G_8 的调速器均采用模型 1 的第 2 组参数,发电机 G_1 和 G_6 没有调速器。由表 1 可

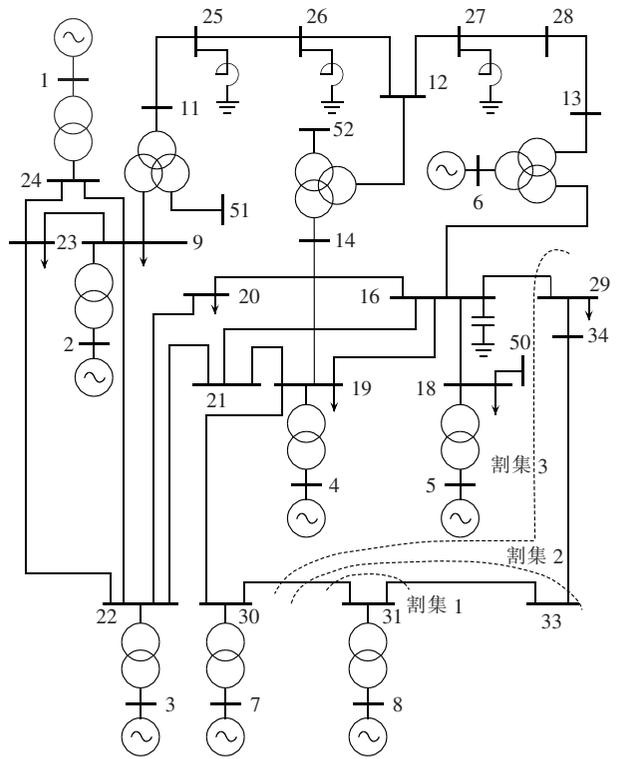


图 3 8 机系统割集示意图

Fig.3 Cutsets of an 8-machine system

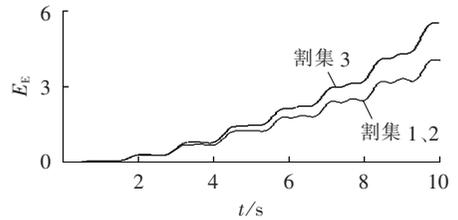


图 4 原动机功率扰动下割集能量

Fig.4 Cutset energy under prime mover disturbance

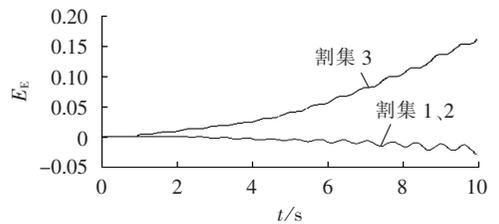


图 5 负荷扰动割集能量

Fig.5 Cutset energy under load disturbance

表 1 割集能量相对发电机有功出力的归一化灵敏度

Tab.1 Normalized sensitivity of cutset energy to active power output of generator

发电机	额定有功出力	割集能量对发电机有功灵敏度	
		割集 1、2	割集 3
G_1	15	0.0147	0.0231
G_2	6	-0.1074	-0.1687
G_3	7.5	-0.0526	-0.0825
G_4	2	-0.1874	-0.2942
G_5	5.1	-0.1143	-0.1794
G_6	0.001	-0.0173	-0.0272
G_7	2.5	-0.0539	-0.0847
G_8	2	-0.0502	-0.0789

见,割集能量对 G_2 、 G_4 和 G_5 的有功输出的灵敏度较一致;对 G_3 、 G_7 和 G_8 的灵敏度也相差不大;由于 G_1 和 G_6 没有调速器,对系统的响应能力较差,割集能量对此 2 台发电机有功输出的灵敏度均较小。割集能量对 G_4 有功输出的灵敏度的绝对值较大,且灵敏度为负值,说明 G_4 有功输出的改变对割集能量的影响比较大,为关键控制机组,且其为增出力节点,所以适当增加 G_4 的有功输出可以抑制振荡,快速恢复系统的稳定运行。

3.2 华中电网算例

以 2009 年华中电网数据为例进一步验证割集能量法在实际系统强迫功率振荡扰动源识别中的实用性。以鄂电网与其他省网之间的断面为割集,规定流出割集的势能为正,流入的为负。华中电网存在一个频率约为 0.4 Hz 的鄂渝区间模式,分别在鄂、湘省网内设置负荷和原动机功率 2 种周期性扰动,扰动时间均为 1~10 s,具体扰动方式设置如下。

a. 鄂负荷扰动:鄂珞珈山 110 负荷母线设置 $\Delta P_L = 250 \sin(2.512t)$ MW。

b. 鄂原动机功率扰动:鄂三峡右 16 号机设置 $\Delta P_T = 100 \sin(2.512t)$ MW。

c. 湘负荷扰动:湘长沙 01 负荷母线设置 $\Delta P_L = 100 \sin(2.512t)$ MW。

d. 湘原动机功率扰动:湘长沙 2 号机设置 $\Delta P_T = 100 \sin(2.512t)$ MW。

系统基准容量为 100 MV·A。鄂负荷扰动和原动机功率扰动结果如图 6、7 所示,不论是鄂原动机功率扰动还是鄂负荷扰动,鄂割集能量均为正,由此判断出扰动源位于鄂省网内。

湘负荷扰动和原动机功率扰动时,支路势能由湘子网经湘鄂断面注入鄂割集,经割集传播后,注入川渝、豫和赣子网,由于鄂割集内部发电机和支路阻尼耗散的作用,流出割集的能量略小于注入的能量,所以割集能量为较小的负值,且其绝对值远远小于流动在各断面的势能,为便于观察,分别给出省间断面势能和鄂割集能量如图 8、9 所示。扰动源位于割集外部时,割集能量直接取决于所选割集本身及系统的潮流方式,故可据此设置相应割集的能量阈值,当割集能量在该阈值内便认为扰动源位于割集外部。可见,割集能量法在实际电力系统中仍然适用。

选取负荷中心处容量较大的几台发电机,就上述扰动方式 1 和扰动方式 2,分别计算扰动切除时刻鄂割集能量对各发电机有功输出的归一化灵敏度,结果见表 2(表中,额定有功出力为标么值)。扰动方式 2 为鄂三峡右 16 号发电机原动机功率扰动,割集能量对三峡右 18 号发电机有功输出的归一化灵敏度比对三峡左 09 号发电机的较大,这易于理解。

2 种扰动方式下鄂襄樊 05 号发电机有功输出的灵敏度均较大,这是由于鄂襄樊 05 号发电机没有安装 PSS, PSS 是抑制系统低频振荡的有效手段之一,关键机组的辨识为 PSS 安装点的选取提供了思路。由表 2 易得,不同扰动方式下,割集能量对同一台发电机有功输出的灵敏度不同,发电机有功出力

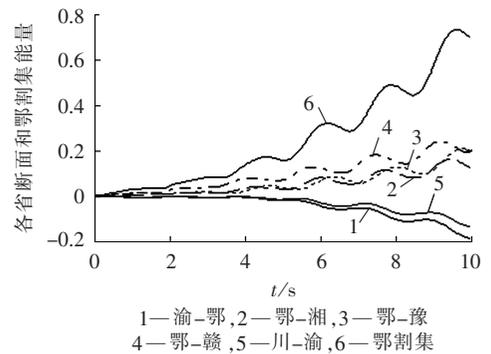


图 6 鄂负荷扰动时断面势能和鄂割集能量
Fig.6 Cutset energy and section energy of Grid E under load disturbance

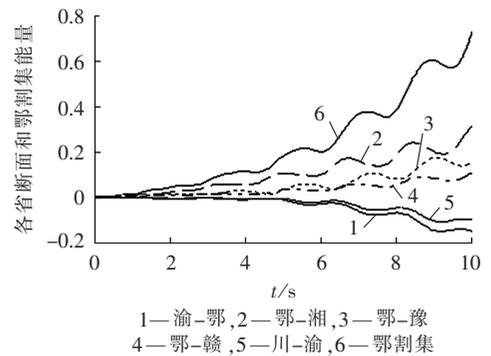
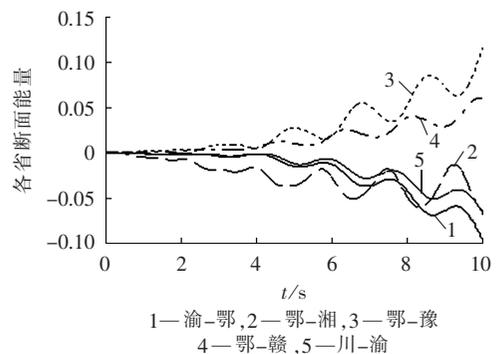
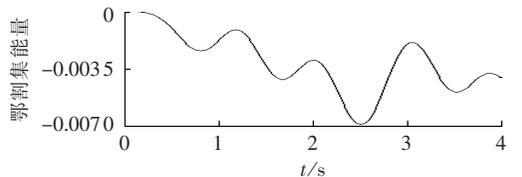


图 7 鄂原动机功率扰动时断面势能和鄂割集能量
Fig.7 Cutset energy and section energy of Grid E under prime mover disturbance

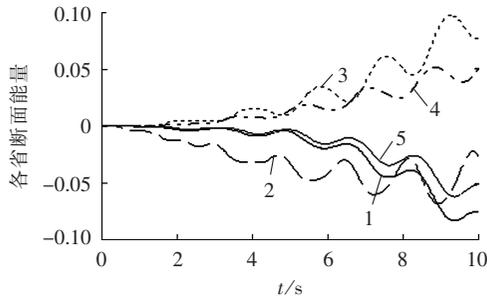


(a) 湘负荷扰动时断面势能



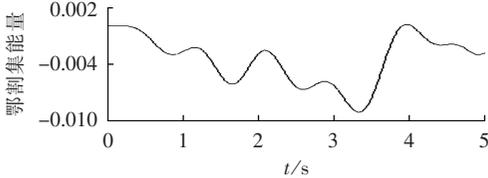
(b) 湘负荷扰动时鄂割集能量

图 8 湘负荷扰动时断面势能和鄂割集能量
Fig.8 Cutset energy and section energy under periodical load disturbance



1—渝-鄂,2—鄂-湘,3—鄂-豫
4—鄂-赣,5—川-渝

(a) 湘原动机功率扰动时断面势能



(b) 湘原动机功率扰动时鄂割集能量

图 9 湘原动机扰动时断面势能和鄂割集能量

Fig.9 Cutset energy and section energy under prime mover disturbance

的改变对割集能量的影响趋势也不同。对于扰动方式 1,三峡左 09 号机为关键的减出力节点,而扰动方式 2 下,该节点反而成为增出力节点,且其对割集能量的影响也远小于鄂汉川 01 号机的作用。

表 2 割集能量相对发电机有功出力的归一化灵敏度

Tab.2 Normalized sensitivity of cutset energy to active power output of generator

部分发电机	额定有功出力	割集能量对发电机有功灵敏度	
		扰动方式 1	扰动方式 2
鄂大别山 01 机	6	-0.0038	1.6726
鄂鄂州扩 01 机	6	-0.0383	0.1364
鄂汉川 01 机	3	-0.0056	2.7130
鄂荆门 06 机	6	-0.1470	0.0620
鄂三峡右 18 机	7	-0.0073	-0.0762
鄂三峡左 09 机	7	0.3097	-0.0196
鄂水布厂 01 机	4.6	-0.0052	0.2413
鄂襄樊 05 机	6	1.3008	-1.9198

割集能量法可借助广域测量系统提供的网络动态信息在线识别强迫功率振荡扰动源所在的割集范围,多次割集能量计算可以提高扰动源定位的准确度,缩小定位范围。根据割集能量对发电机变量的灵敏度分析确定出关键控制机组,有利于运行人员及时采取控制措施,快速恢复系统的稳定,此法在电力调度安全管理中具有较好的应用前景。

4 结论

a. 割集能量法适用于原动机功率扰动和负荷扰动下强迫功率振荡扰动源的识别,其判据为:若割集能量为正值,扰动源应位于割集内部;否则扰动源位于割集外部。

b. 割集能量对发电机有功出力的灵敏度绝对

值较大的发电机为关键控制机组;灵敏度为正值的发电机可调节节点为减出力节点,否则为增出力节点。

c. 依托广域测量系统提供的网络动态信息,割集能量法可在线识别强迫功率振荡扰动源所在的割集范围,提高扰动源定位的准确度;灵敏度分析法可确定出关键控制机组,快速恢复系统的稳定。

d. 基于割集能量及灵敏度的强迫功率振荡扰动源识别方法在电力调度安全管理中具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 鲍颜红,杨卫东,徐泰山. 基于线性化模型的电力系统强迫功率振荡分析[J]. 江苏电机工程,2008,27(3):1-3.
BAO Yanhong,YANG Weidong,XU Taishan. Analysis of forced power oscillation based on linear model[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2008,27(3):1-3.
- [3] 余一平,闵勇,陈磊. 多机电力系统强迫功率振荡稳态响应特性分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):5-9.
YU Yiping,MIN Yong,CHEN Lei. Analysis of forced power oscillation steady state response properties in multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(22):5-9.
- [4] 原蔚鹏,李玲,陈家荣. 用支路势能法和局部测量研究暂态稳定及识别临界割集[J]. 中国电力,2009,42(3):12-16.
YUAN Weipeng,LI Ling,CHEN Jiarong. Transient stability and critical cutset recognition based on line potential energy method and local measurement[J]. Electric Power,2009,42(3):12-16.
- [5] JING C,MCCALLEY J D,KOMMAREDD Y M. An energy approach to analysis of interarea oscillations in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1996,11(2):734-740.
- [6] 刘群英,刘俊勇,刘起方. 基于支路势能信息的电网脆弱性评估[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):6-11.
LIU Qunying,LIU Junyong,LIU Qifang. Network vulnerability assessment based on line potential energy information[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(10):6-11.
- [7] STATON S E. Transient stability monitoring for electric power systems using a partial energy function[J]. IEEE Trans on Power Systems,1989,4(4):1389-1396.
- [8] 韩志勇,贺仁睦,徐衍会. 基于能量角度的共振机理电力系统低频振荡分析[J]. 电网技术,2007,31(8):13-16.
HAN Zhiyong,HE Renmu,XU Yanhui. Analysis on power system low frequency oscillations originated in resonance mechanism from viewpoint of energy[J]. Power System Technology,2007,31(8):13-16.
- [9] 余一平,闵勇,陈磊,等. 基于能量函数的强迫功率振荡扰动源定位[J]. 电力系统自动化,2010,34(5):1-6.
YU Yiping,MIN Yong,CHEN Lei,et al. Disturbance source locating based on energy function in forced power oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(5):1-6.
- [10] 韩志勇,贺仁睦,马进. 电力系统强迫功率振荡扰动源的对比分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):16-19.

- HAN Zhiyong, HE Renmu, MA Jin. Comparative analysis of disturbance source inducing power system forced power oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 16-19.
- [11] 余一平, 闵勇, 陈磊, 等. 周期性负荷扰动引发强迫功率振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 7-11.
YU Yiping, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Analysis of forced power oscillation caused by periodical load disturbance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 7-11.
- [12] 孙闻, 房大中, 袁世强. 基于轨迹灵敏度的暂态稳定预防控制方法[J]. 天津大学学报, 2010, 43(2): 109-114.
SUN Wen, FANG Dazhong, YUAN Shiqiang. Power system preventive control for transient stability enhancement based on trajectory sensitivity technique[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(2): 109-114.
- [13] 廖清芬, 刘涤尘, 党杰. 励磁系统模型和参数对低频振荡特征值的灵敏度分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 69-73.
LIAO Qingfen, LIU Dichen, DANG Jie. Sensitivity analysis of low frequency oscillation eigenvalue to excitation system model and parameter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 69-73.
- [14] 蒋平, 栗楠, 顾伟. PSS 和 SVC 联合抑制特高压网络低频振荡[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 13-17.
JIANG Ping, LI Nan, GU Wei. Restraining low frequency oscillation of UHV power grid using PSS and SVC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 13-17.
- [15] 程临燕, 张保会, 郝治国. 基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 46-49.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 46-49.
- [16] 邓佑满, 黎辉, 张伯明. 电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 5-8.
DENG Youman, LI Hui, ZHANG Boming. Adjustment of equal and opposite quantities in pairs for strategy of active power security correction of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 5-8.

作者简介:



王娜娜(1987-),女,河南周口人,硕士,从事电力系统运行与控制等方面的研究(E-mail: wangnana668@163.com);

廖清芬(1975-),女,浙江衢州人,副教授,博士,从事电机及电力系统的稳定与控制等方面的教研工作(E-mail: qliao@whu.edu.cn);

王娜娜

唐飞(1982-),男,湖北黄石人,博士,从事电力自动监控技术等方面的研究;

李文锋(1979-),男,山东禹城人,博士,从事发电机励磁及电力系统稳定方面的研究。

Disturbance source identification based on cutset energy and sensitivity for forced power oscillation

WANG Nana^{1,2}, LIAO Qingfen¹, TANG Fei¹, LI Wenfeng³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: The continuous and cyclical small disturbance in power system may cause forced power oscillation on tie line. It is difficult to locate the disturbance source. A method based on cutset energy and normalized sensitivity is proposed to identify the disturbance source of forced power oscillation, which, based on the energy conversion characteristics of forced power oscillation, defines the concept of cutset energy, identifies the disturbance source according to the flow of cutset energy, and recognizes the critical generators by analyzing the normalized sensitivity of cutset energy to the active power output of generators. Its correctness and practicability are verified by the case studies for an 8-machine system and the Central China Grid system. Based on the dynamic network information provided by the wide area measurement system, the proposed method can online identify precisely the cutset where the disturbance source of forced power oscillation caused by prime mover power disturbance or load disturbance locates.

Key words: electric power systems; wide area system; forced power oscillation; cutset energy; sensitivity analysis; disturbance source identification