

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.023

基于单摆方程的电力系统同调性量化分析

刘学华¹, 魏繁荣²

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 美国罗德岛大学电气计算机及生物医学工程系, 美国 罗德岛州 金士顿 02881)

摘要:电力系统受扰后的非同调可能导致动态等值不准确,影响系统的安全稳定分析。为此,文中提出能计及阻尼力矩影响的电力系统同调性量化分析方法。首先,基于单摆方程推导电力系统受扰后其动态等值系统周期特性表达式,分析电力系统动态等值与同调性的关联关系;其次,在确定故障场景中,根据等值系统转子角轨迹的上下边界提出运动周期的估算方法,通过比较估算周期与实测周期的差异提出电力系统同调性的量化分析指标;然后,研究系统阻尼力矩影响,基于估算周期提出系统动态阻尼特性的量化评估指标;最后,两个典型系统算例仿真表明,文中所提方法与指标均有效可靠,可为电力系统安全稳定校核提供参考。

关键词:同调性;动态等值;单摆方程;轨迹;阻尼特性

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0162-07

0 引言

大规模电力系统的动态安全分析需考虑预想故障、远方调整以及特高压与新能源接入等因素的影响^[1-3]。为了快速校核电网的安全稳定性^[4-5],工程上一般根据电力系统微分方程或受扰轨迹,基于故障场景将复杂高维的实际系统等值为简单低阶的小系统^[6],该过程称为电力系统的动态等值。

动态等值一般基于发电机转子角或母线电压的同调特性^[7],即受扰动后对应状态量或代数量响应运动趋势的一致性^[8]。研究中常使用2台发电机的相对转子角偏差衡量其同调程度^[9]。电力系统受扰后发电机响应的非同调可能导致动态等值不准确,使等值系统的静态或暂态稳定分析结果无法反映系统的真实动态特性,影响系统的安全稳定分析^[10]。

当前电力系统同调性研究按对象不同分为三类:模型法、轨迹法以及混合法。模型法基于电力系统拓扑及发电机模型参数预测其时域响应的同调特性。传统模型法多采用频域近似或特征模式分析^[11-12],根据关键特征向量的相位辨识发电机同调分群^[13]。但实际系统的动态特性与线性模型不完全相同,因此有研究尝试直接根据系统参数计算机电距离,进而评估同调性^[14-15]。轨迹法直接从受扰轨迹提取同调信息或信号特征,对发电机进行聚类^[16]。一类研究应用人工智能直接构建发电机转子角轨迹特征到系统同调性的映射关系,代表方法有支持向量机与人工神经网络^[17-18];另一类研究尝

试从轨迹中提取信号特征,典型方法有奇异值分解与谱聚类^[19-20]。

模型法难以处理系统动态特性随扰动场景变化的问题,轨迹法缺乏机理分析,导致强壮性不足^[21]。为此,有研究结合模型与轨迹分析暂态能量函数与电力系统同调性的关联关系,即混合法^[22-23]。文献[24]研究了发电机同调与动态等值的关系,提出原系统理想同调与等值系统保留全部动态特性的等价性。然而,任何现有方法都无法辨识理想同调的发电机分群。因此,有必要研究电力系统同调性的量化分析方法,评估电力系统动态等值的准确性,为电力系统安全稳定分析提供支撑。文中基于单摆方程分析了电力系统受扰后的动态特性,提出理想同调情况下动态等值系统运动周期的估算方法,从估算周期与实测周期的差值中提取指标,实现电力系统同调性的量化分析,为电力系统安全稳定校核提供参考。

1 电力系统的动态等值

按照不同的参考基准,基于发电机受扰轨迹的动态等值方法可分为角度中心(center of angle, COA)等值与惯量中心(center of inertial, COI)等值。前者将所有发电机角度的代数平均值作为COA,常用于研究单台发电机相对COA的运动特性;后者按照各机惯量大小对发电机转子角进行加权得到COI,典型应用是电力系统暂态稳定的扩展等面积准则(extended equal area criterion, EEAC)^[25]。

从数学模型角度研究等值系统的动态特性,文中选择具有明确物理意义的COI等值。具有 n 台

发电机的原系统经一系列变换,受扰后的响应特性被描述为单机无穷大系统(single machine infinite bus, SMIB)。不计阻尼时,等值系统动态模型可表示为微分方程:

$$\ddot{\delta} + \alpha \sin(\delta - \theta) + \gamma = 0 \quad (1)$$

式中: δ 为惯量等值系统的发电机角度; α, θ 分别为等值系统功率特性正弦分量的幅值与相位; γ 为等值系统微分方程的常数项。各参数的详细定义可参考 EEAC 理论。

2 单摆方程的周期特性

2.1 典型等值受扰轨迹

电力系统受扰后的动态过程一般包含等值 SMIB 角度的多个往复运动摆次,如图 1 所示。将等值 SMIB 角度的局部极大值称为上边界(upper boundary point, UBP),对应地将其局部极小值称为下边界(lower boundary point, LBP)。

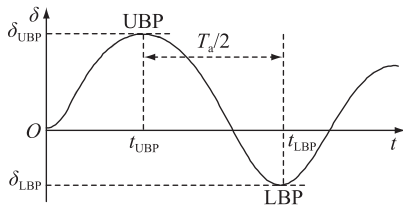


图 1 等值 SMIB 的角度曲线

Fig.1 Angle curve of equivalent SMIB

图 1 中, $\delta_{\text{UBP}}, \delta_{\text{LBP}}$ 分别为 UBP 和 LBP 对应的角; $t_{\text{UBP}}, t_{\text{LBP}}$ 分别为 UBP 和 LBP 对应的时间; T_a 为实际等值轨迹的运动周期。

因实际振荡中 UBP 与 LBP 的时序关系并不确定,为方便推导,参考图 1 中 UBP 和 LBP 相对位置,假设 $\delta_{\text{LBP}} < \delta_{\text{UBP}}, t_{\text{LBP}} > t_{\text{UBP}}$,且 $T_a = 2(t_{\text{LBP}} - t_{\text{UBP}})$ 。

2.2 动态等值系统的单摆方程

式(1)为等值 SMIB 的微分方程。令等值角速度 ω 为:

$$\omega_B \omega = d\delta/dt \quad (2)$$

式中: ω_B 为 ω 的标么基值,取 314 rad/s。则:

$$\ddot{\delta} = \omega_B \omega d\omega/d\delta \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)得:

$$\omega_B \omega d\omega = -\gamma d\delta - \alpha \sin(\delta - \theta) d\delta \quad (4)$$

以 UBP 为起点,针对 δ 从 δ_{UBP} 运动到 δ_{LBP} 过程中任一点,式(4)两边求积分得:

$$\int_{\omega_{\text{UBP}}}^{\omega} \omega_B \omega d\omega = -\int_{\delta_{\text{UBP}}}^{\delta} \gamma d\delta - \int_{\delta_{\text{UBP}}}^{\delta} \alpha \sin(\delta - \theta) d\delta \quad (5)$$

式中: ω_{UBP} 为 UBP 对应的角速度。

式(5)中积分展开为:

$$\omega_B(\omega^2 - \omega_{\text{UBP}}^2)/2 = -\gamma(\delta - \delta_{\text{UBP}}) + \alpha[\cos(\delta - \theta) - \cos(\delta_{\text{UBP}} - \theta)] \quad (6)$$

考虑到边界点处 $\omega_{\text{UBP}} = \omega_{\text{LBP}} = 0$,将式(6)变形可得 UBP 与 LBP 之间任意 ω 为:

$$\omega = \{2[-\gamma(\delta - \delta_{\text{UBP}}) + \alpha[\cos(\delta - \theta) - \cos(\delta_{\text{UBP}} - \theta)]]/\omega_B\}^{1/2} \quad (7)$$

类似于理想的单摆模型,任意位置的速度仅与位移有关,与时间无关。取任意时刻等值发电机转子角到积分起始点的 N 等分:

$$\Delta\delta = (\delta - \delta_{\text{UBP}})/N \quad (8)$$

则第 k 个点等值发电机角度为:

$$\delta_k = \delta_{\text{UBP}} + k\Delta\delta \quad (9)$$

为研究等值系统的动态特性,设第 k 段 $\Delta\delta$ 微元对应时间的微增量为:

$$\Delta t_k = \Delta\delta/\omega_k \quad (10)$$

式中: ω_k 为第 k 个点的角速度。

则系统从起始点 UBP 运行到任意位置所用的时间 t_{Σ} 可表示为所有分段微增量的累加。

$$t_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N \Delta t_k \quad (11)$$

当分析点取为 LBP 时, t_{Σ} 反映了等值角度的轨迹从 UBP 到 LBP 所用的时间,即 $t_{\text{LBP}} - t_{\text{UBP}}$,具有半周期的物理意义。令 $N \rightarrow \infty$,则式(11)可改写为连续积分形式,定义其为无阻尼估算周期 T_0 。

$$T_0 = 2 \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N \frac{\delta_k - \delta_{\text{UBP}}}{N\omega_k \omega_B} = \int_{\delta_{\text{UBP}}}^{\delta_{\text{LBP}}} \sqrt{2/\omega_B} [-\gamma(\delta - \delta_{\text{UBP}}) + \alpha[\cos(\delta - \theta) - \cos(\delta_{\text{UBP}} - \theta)]]^{-1/2} d\delta \quad (12)$$

2.3 阻尼力矩的近似校正量

将式(5)中积分上限设为 $\omega_{\text{LBP}}, \delta_{\text{LBP}}$,研究等值系统从 UBP 运行到 LBP 的过程。

$$\omega_B(\omega_{\text{LBP}}^2 - \omega_{\text{UBP}}^2)/2 = -\gamma(\delta_{\text{LBP}} - \delta_{\text{UBP}}) + \alpha[\cos(\delta_{\text{LBP}} - \theta) - \cos(\delta_{\text{UBP}} - \theta)] + W_D \quad (13)$$

式(13)等号左边描述了等值系统在 UBP 和 LBP 处动能的变化量,考虑到边界点处 ω 为 0,式(13)等号右边恒等于 0,定义 δ 从 δ_{UBP} 运行到 δ_{LBP} 的过程中阻尼做功 W_D 为:

$$W_D = \gamma(\delta_{\text{LBP}} - \delta_{\text{UBP}}) - \alpha[\cos(\delta_{\text{LBP}} - \theta) + \cos(\delta_{\text{UBP}} - \theta)] \quad (14)$$

实际系统中,阻尼力矩叠加在加/减速力矩中影响任意点的角加速度,从而对等值 SMIB 做功,任一点的阻尼力矩大小与角速度直接相关,无法通过

式(1)的微分方程求解。为了在等值 SMIB 动态特性分析中计及阻尼力矩影响,假设阻尼转矩在角度位移过程中平均做功。令:

$$W_D = w_D(\delta - \delta_{UBP}) \quad (15)$$

相当于将 W_D 从数值上分解为 N 等份,平均分配到 UBP 到 LBP 之间 N 个 $\Delta\delta$ 分段中,则:

$$w_D = W_D/(\delta_{LBP} - \delta_{UBP}) \quad (16)$$

由此,等值 SMIB 的微分方程在 δ 从 δ_{UBP} 运动到 δ_{LBP} 的过程中被修正为:

$$\ddot{\delta} + \alpha \sin(\delta - \theta) + \gamma + w_D = 0 \quad (17)$$

则估算计及阻尼力矩后等值 SMIB 的周期 T_D 为:

$$T_D = \int_{\delta_{UBP}}^{\delta_{LBP}} \sqrt{2/\omega_B} | -(\gamma + w_D)(\delta - \delta_{UBP}) + \alpha[\cos(\delta - \theta) - \cos(\delta_{UBP} - \theta)] |^{-\frac{1}{2}} d\delta \quad (18)$$

理论上式(12)和式(18)均可变换为非完全的椭圆积分形式,从而化简为初等积分。然而,实际工程计算中,根据积分轨迹或实测轨迹得到 UBP 与 LBP 的坐标后,易使用数值方法求取 T_0, W_D, T_D 。

3 等值系统同调性的量化评估指标

当系统理想同调且阻尼为 0 时,其动态模型可等值为参数定常的 SMIB,如式(1)所示。此时,无阻尼估算周期与实测周期相等,即 $T_0 = T_a$ 。若系统阻尼力矩不为 0,则式(17)可近似描述等值 SMIB 的动态特性,有 $T_D \approx T_a$ 。换言之,一般地,电力系统理想同调时可以用 T_D 近似描述其动态响应的周期特性;特殊地,阻尼为 0 时, $T_D = T_0 \approx T_a$ 的数值解。

定义动态等值的 SMIB 周期估算误差为:

$$\varepsilon = \frac{|T_D - T_a|}{T_a} \times 100\% \quad (19)$$

ε 评估了理想同调假设下,估算周期与实际轨迹测量周期的差异,量化反映了原系统受扰轨迹的非同调特性。因此,设计基于单摆方程的电力系统同调性评估指标为:

$$I = \min(1, |1 - \varepsilon|) \times 100\% \quad (20)$$

I 量化评估了确定分群模式后,等值 SMIB 角度轨迹的同调程度, $I \in (0, 100\%]$ 。当 I 为 100% 时, SMIB 理想同调,估算周期无误差;随着 I 减小,系统同调性不断降低。算例分析显示, I 的取值与动态等值的主导分群模式有关。当动态等值的分群模式与实际振荡一致时, I 数值较大(一般大于 70%);当多个分群模式同时作用时, I 的数值一般为 50%~70%;当所选分群模式非主导时, I 的数值一般低

于 50%。

另外,结合仿真可知,阻尼力矩起积极作用时,其可抑制等值 SMIB 角度曲线的发散。 w_D 作用使角速度小于 0 阻尼力矩时的情况,有 $T_D > T_0$;反之,若阻尼力矩起负面作用,有 $T_D < T_0$ 。因此,设计指标 D 定量评估系统阻尼力矩对动态特性的影响,如式(21)所示。

$$D = (T_D - T_0)/T_0 \quad (21)$$

由此,基于 2 个估算周期的差值可以实现等值系统阻尼力矩作用效果的定量评估。

4 算例分析

4.1 SMIB 同调性分析

基于 SMIB 验证文中所提周期估算方法以及阻尼特性评估指标的准确性,系统拓扑如图 2 所示。发电机采用经典二阶模型,负荷假定为恒阻抗。

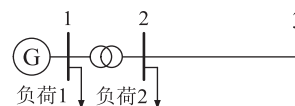


图 2 SMIB 拓扑

Fig.2 Topology of SMIB

SMIB 为理想同调多机系统的动态等值,经典模型中阻尼力矩仅与发电机阻尼转矩系数有关,该系统适用于校核 T_D 的准确性以及指标 D 与系统阻尼特性的关联关系。系统在临界稳定状态时,电磁功率特性在 UBP 和 LBP 附近具有很强的非线性,具体表现为边界点处角加速度接近 0,周期估算误差较大。故障清除时间对时域响应周期特性的影响如图 3 所示。0 时刻在节点 2 设置三相瞬时短路故障,故障持续时间分别为 0.02 s, 0.070 4 s,其中 0.070 4 s 为临界故障清除时间。

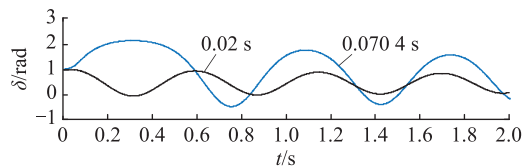


图 3 故障清除时间对时域响应周期特性的影响

Fig.3 The influence of fault clearing time on time domain response period characteristics

由图 3 可知,临界稳定时清除故障,波形振荡周期增大。因此,使用瞬时故障与临界故障分别校核 T_D, D 在一般情况与极端情况的准确性。仿真中,瞬时故障设置为线路 2—3 首端发生三相瞬时短路,故障在 0.02 s 时自动消失,改变发电机阻尼转矩系数,测量 T_a ,计算 T_0, T_D, ε, D ,如表 1 所示。

表1 不同阻尼系数的 SMIB 瞬时故障后周期与阻尼估算

Table 1 The period and damping estimation of SMIB after transient fault under different damping coefficients

阻尼转矩系数	T_a/s	T_0/s	T_D/s	$\varepsilon/\%$	$D/\%$
-3	0.584 0	0.689 8	0.580 4	0.61	-18.84
-2	0.574 2	0.656 2	0.575 1	0.16	-14.11
-1	0.566 9	0.622 6	0.565 9	0.17	-10.01
0	0.560 2	0.560 4	0.560 4	0.04	0
1	0.554 1	0.499 7	0.554 7	0.10	9.92
2	0.552 5	0.476 3	0.551 2	0.23	13.59
3	0.548 1	0.458 9	0.545 9	0.41	15.93

表1中,根据式(19)可估算 SMIB 的 T_D 相对 T_a 的误差平均值为 0.25%,且误差均小于 1%,验证了文中方法通过 UBP 和 LBP 的信息可准确推算转子角运动的半周期。另外,作为该系统唯一的阻尼力矩来源,发电机阻尼转矩系数与系统阻尼成正比,文中所提定量指标 D 的符号与发电机阻尼转矩系数始终保持一致,且其数值与阻尼转矩系数具有单调关系,一定程度上展示了 SMIB 动态过程的阻尼特性。

临界故障类型的地点信息与瞬时故障相同,短路自动消失时间调整为首摆不发生暂态失稳的临界清除时间,此时电力系统首摆与次摆的动态过程具有极强的非线性,相较普通故障,其周期特性发生畸变,如图3所示。针对临界故障后首个 UBP 和 LBP,分别计算 T_0, T_D, ε, D ,如表2所示。大量算例证实,该类情况一般代表了相应故障场景周期估算的最大误差。

表2 不同阻尼系数的 SMIB 临界故障后周期与阻尼估算

Table 2 The period and damping estimation of SMIB after critical fault under different damping coefficients

阻尼转矩系数	T_a/s	T_0/s	T_D/s	$\varepsilon/\%$	$D/\%$	故障清除时刻/s
-3	0.630 1	0.753 1	0.613 1	2.69	-22.85	0.053 5
-2	0.680 0	0.800 1	0.661 5	2.72	-20.96	0.060 0
-1	0.752 5	0.857 6	0.731 8	2.68	-17.19	0.065 3
0	0.954 1	0.958 5	0.958 5	0.47	0	0.069 1
1	0.888 3	0.870 1	0.895 8	0.88	2.87	0.070 4
2	0.856 7	0.837 9	0.881 3	2.95	4.92	0.071 5
3	0.768 2	0.706 6	0.786 3	2.38	10.13	0.072 2

由表2可知,在极端的临界故障情况下, T_D 相对 T_a 的误差平均值为 2.11%,依然保持在较低水平。指标 D 与系统阻尼力矩的关系依然保持正相关。另外,阻尼为负时, T_D 与 T_0 的偏差变大;阻尼为正

时, T_D 与 T_0 的偏差变小。负阻尼的临界算例中第二摆发生暂态失稳,周期畸变的原因包含扰动注入能量与负阻尼力矩两方面。正阻尼的临界算例中后续摆次是稳定的,周期畸变的原因主要为扰动注入的能量。

4.2 4机11节点系统同调性分析

为了验证文中指标分析系统同调性的有效性,选择如图4的经典4机11节点系统进行测试。发电机采用经典二阶模型,负荷假定为恒阻抗,系统参数详见文献[26]。

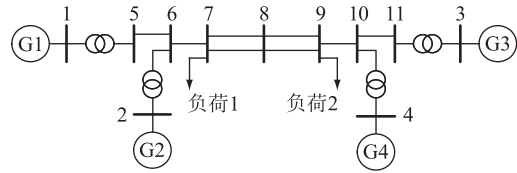


图4 典型4机11节点系统拓扑

Fig.4 Typical topology of 4-machine 11-bus system

初始条件下网络参数与发电机模型严格按照母线8左右对称,调节负荷1为 $1.374+0.111j$ p.u., 负荷2为 $1.663+0.111j$ p.u.,故障设置为线路9—10末端三相短路,0.07 s后故障自动消失。仿真发现, (G1, G2) 相对 (G3, G4) 为主要的同调分群。为获得不同同调性场景,调整 G1, G2, G3 动态模型参数以及线路7—8, 线路8—9的长度,计算相应同调性指标 I 。该试验系统中, G1 与 G2, G3 与 G4 的模型参数差异越大,该分群模式下系统同调性越差;线路7—8和线路8—9长度越短,系统同调性越差。部分仿真结果如表3所示。

表3 4机11节点系统的非同调参数调整倍数及指标 I

Table 3 Non-coherent parameter adjustment multiples and index I of 4-machine 11-bus system

算例	G1	G2	G3	G4	线路7—8	线路8—9	$I/\%$
1	1	1	1	1	1	1	98.30
2	1.05	0.95	0.80	1	0.80	0.80	90.81
3	1.15	0.85	0.50	1	0.70	0.70	73.24
4	1.25	0.75	0.50	1	0.50	0.50	64.90
5	1.50	0.50	0.40	1	0.25	0.25	45.81

对应参数下系统的时域仿真曲线如图5所示,随着 (G1, G2) 相对 (G3, G4) 对应动态等值系统的同调性不断下降, I 从 98.30% 依次降低到 45.81%。由图5可知,文中所提指标 I 能有效反映系统发电机转子角轨迹的同调性。

为进一步验证文中同调性指标的有效性,选择同调性代表性指标 S_1 与 S_2 验证其有效性^[17],指标定义为:

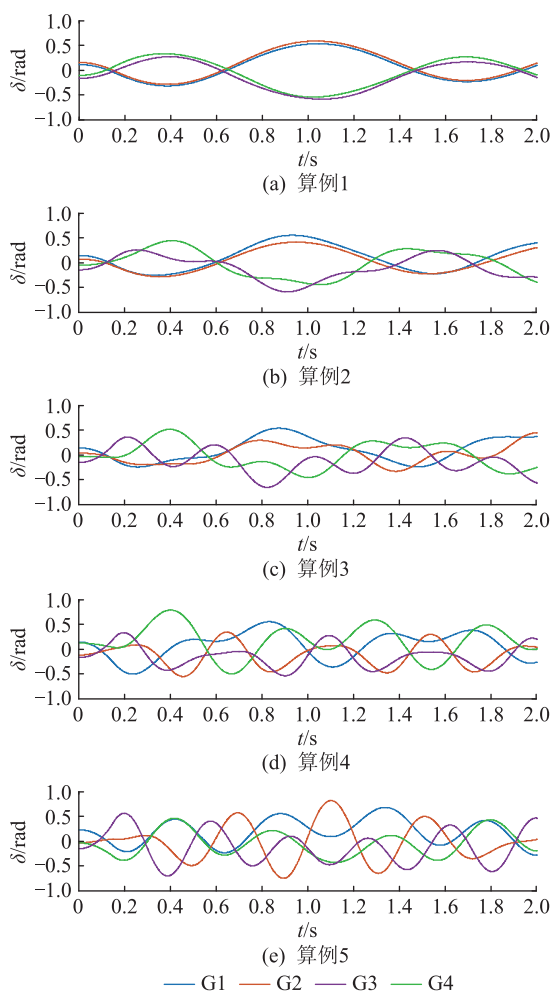


图5 4机11节点系统非同调参数调整后的受扰轨迹
Fig.5 Disturbed trajectory of 4-machine 11-bus system after adjusting the non-coherent parameters

$$S_1(i, j) = \max_{t < t_{END}} [\Delta\delta_i(t) - \Delta\delta_j(t)] \quad (22)$$

$$S_2(i, j) = \sqrt{ \left| \int_0^{t_{END}} \Delta\delta_i^2(t) - \Delta\delta_j^2(t) dt \right| } / t_{END} \quad (23)$$

式中： t 为分析时段内任意时刻； t_{END} 为终止时间； $\Delta\delta_i(t) = \delta_i(t) - \delta_i(0)$ 为 t 时刻第 i 台发电机角度相对0时刻初值的变化量。

指标 S_1, S_2 分别利用一段时间内同群任2台发电机 i, j 角度变化量差值的最大值及其在研究时段内的累积量来评估系统同调性,指标越小则同调性越强。针对表3中不同同调性场景,使用典型指标 S_1, S_2 验证文中所提指标的有效性,结果如表4所示。由表4中算例1—算例3可知, I 能准确反映G1与G2的非同调性变化。特殊地,对于算例4与算例5,当同调分群发生改变时, I 依然能用于同调性量化评估。而传统指标 S_1 与 S_2 是基于多机角度的相对变化量,在分析不同算例同调性时存在一定的局限性。

表4 I 的有效性验证

Table 4 Validity verification of I			
算例	算例同调分群	$S_1(1,2)$	$S_2(1,2)$
1	(G1,G2)对(G3,G4)	0.019 9	0.007 4
2	(G1,G2)对(G3,G4)	0.070 8	0.029 7
3	(G1,G2)对(G3,G4)	0.730 4	0.253 7
4	(G1,G3)对(G2,G4)	0.747 7	0.314 5
5	(G1,G3)对(G2,G4)	1.046 7	0.397 5

4.3 指标有效性探讨

同调性的定义依赖于动态等值的分群模式,仿真发现,一个分群模式同调性的降低可能意味着其他分群模式同调性的提高。传统的同调性评估方法一般针对给定分群,计算一段时间内角度差的最大值或差分量的积分,在多机系统中缺乏对全局同调特性的评估。文中同调性指标基于确定分群的惯量等值系统,具有明确的物理意义,能够量化分析同一分群模式下各发电机的同调程度,为动态等值的相关研究提供校验工具,未来有希望在此基础上提出有效的发电机同调分群辨识方法。

5 结语

文中根据电力系统单摆方程的周期特性,提出一种动态等值系统同调性的量化评估方法。当系统理想同调时,其动态行为的周期特性满足基于单摆方程推导的定积分表达式,结果的差异性越大,系统同调性越差。基于此,文中首先从动态等值系统的角度曲线中提取UBP和LBP的信息,结合微分方程特性实现了计及阻尼力矩影响的等值系统周期估算;随后通过估算周期与实测周期作差标么化,提出发电机受扰轨迹同调程度的量化分析指标。在所提指标的基础上,分析了阻尼力矩对动态特性的影响,进一步提出系统阻尼特性的定量评估方法。周期与系统阻尼的估算在SMIB中得到验证,同调性分析在4机11节点系统得到验证。

这种基于轨迹的电力系统同调性量化评估方法,可广泛应用于大规模电网的动态等值校验,帮助解决静态或暂态稳定分析中系统降阶的有效性评估问题。文中方法的局限性在于,电力系统单摆方程推导忽略了复杂模型与控制器的影响,在实际系统中随着仿真时间或测量时段的延长,指标准确性不断下降。因此,文中指标仅可用于研究扰动后较短时间内(首摆或前几摆)的同调特性,不能用于系统同调性随时间变化的研究。

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.

- NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. Theory and analysis of power system dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [2] 廖书寒, 查晓明, 黄萌, 等. 适用于电力电子化电力系统的同调等值判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2589-2598, 2827.
- LLAO Shuhan, ZHA Xiaoming, HUANG Meng, et al. Coherency criterion applicable to power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2589-2598, 2827.
- [3] 刘扬, 唐飞, 施浩波, 等. 一种考虑风电场并网的电力系统在线同调识别策略[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1236-1245.
- LIU Yang, TANG Fei, SHI Haobo, et al. An online coherency identification strategy for power system considering wind farm integration[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1236-1245.
- [4] MIAH A M. Study of a coherency-based simple dynamic equivalent for transient stability assessment [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(4): 405.
- [5] 赵良, 张文朝, 马世英, 等. 南方电网在线稳定分析中的动态等值方案[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 31-35, 41.
- ZHAO Liang, ZHANG Wenchao, MA Shiyang, et al. Dynamic equivalence schemes of Southern China power grid for on-line stability analysis[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 31-35, 41.
- [6] YOU H, VITTAL V, WANG X M. Slow coherency-based islanding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 483-491.
- [7] 俞嘉晨, 李宗翰, 刘道伟, 等. 基于短时电压相量轨迹的同调机群快速预估方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2020[2020-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.202004-14.1216.003.html>.
- YU Jiachen, LI Zonghan, LIU Daowei, et al. A fast prediction method of coherent generator based on short-time voltage phase trajectories[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2020[2020-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20200414.1216.003.html>.
- [8] 杨靖萍, 徐政. 基于同调机群识别的动态等值方法的工程应用[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 68-71.
- YANG Jingping, XU Zheng. Application of dynamic equivalence based on identification of coherent generator group in engineering[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 68-71.
- [9] 彭伟, 徐泰山. 电力系统动态等值中发电机的选择方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 48-52.
- PENG Wei, XU Taishan. A generator selection method for power system dynamic equivalents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 48-52.
- [10] 崔晓丹, 李兆伟, 方勇杰, 等. 群内非同调对主导模式暂态稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 61-70.
- CUI Xiaodan, LI Zhaowei, FANG Yongjie, et al. Influence analysis of interior non-coherence of leading generator cluster to the transient stability of dominant mode [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 61-70.
- [11] 胡杰, 余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 26-30.
- HU Jie, YU Yixin. A practical method of parameter aggregation for power system dynamic equivalence[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 26-30.
- [12] OURARI M L, DESSAINT L A, DO V Q. Dynamic equivalent modeling of large power systems using structure preservation technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1284-1295.
- [13] 张剑, 孙元章, 徐箭, 等. 基于同调性的电动机动态聚合方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 48-52.
- ZHANG Jian, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. A dynamic aggregation method for induction motors based on their coherent characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 48-52.
- [14] 周海强, 鞠平, 孔德超, 等. 基于机电距离的聚类方法在动态等值中的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 14-17.
- ZHOU Haiqiang, JU Ping, KONG Dechao, et al. Application of clustering method based on electromechanical distance between different units in power system dynamic equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 14-17.
- [15] 张海波, 李增楠, 孙玉伟, 等. 基于层次分析模型的同调机群自动识别方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 81-86, 116.
- ZHANG Haibo, LI Zengnan, SUN Yuwei, et al. An automatic identification method for coherent generator groups based on analytic hierarchy process model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 81-86, 116.
- [16] 廖庭坚, 刘光晔, 雷强, 等. 计及电动机负荷的电力系统动态等值分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1442-1446.
- LIAO Tingjian, LIU Guangye, LEI Qiang, et al. Analysis of dynamic equivalence with consideration of motor loads in power systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1442-1446.
- [17] 文俊, 刘天琪, 李兴源, 等. 在线识别同调机群的优化支持向量机算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 80-85.
- WEN Jun, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. On-line identification of coherent generator using optimized LS-SVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 80-85.
- [18] MA F, VITTAL V. A hybrid dynamic equivalent using ANN-based boundary matching technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1494-1502.
- [19] 朱乔木, 陈金富, 段献忠, 等. 基于奇异值分解的同调机群识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 591-600.
- ZHU Qiaomu, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, et al. A coherent generators identification method based on singular value decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 591-600.
- [20] 李雪, 姜涛, 陈厚合, 等. 基于图分割的电力系统同调机群辨识新方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6815-

- 6825, 7095.
- LI Xue, JIANG Tao, CHEN Houhe, et al. A graph cut approach for separating coherent groups of generators in bulk power grid using synchrophasors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23):6815-6825, 7095.
- [21] 倪敬敏, 沈沉, 谭伟, 等. 一种基于非平衡点处线性化的同调识别方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20):7-12.
- NI Jingmin, SHEN Chen, TAN Wei, et al. A coherence identifying method based on linearization at non-equilibrium point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20):7-12.
- [22] 苟竞, 刘俊勇, 魏震波, 等. 一种基于发电机对相对能量的电力系统临界机群快速辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24):6322-6330.
- GOU Jing, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. A fast approach to identify power system critical machines cluster based on relative energy of pair-wise generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24):6322-6330.
- [23] 姚海成, 周坚, 黄志龙, 等. 一种工程实用的动态等值方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19):111-115.
- YAO Haicheng, ZHOU Jian, HUANG Zhilong, et al. A practicable method for dynamic equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19):111-115.
- [24] 许剑冰, 薛禹胜, 张启平, 等. 电力系统同调动态等值的述评[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14):91-95.
- XU Jianbing, XUE Yusheng, ZHANG Qiping, et al. A critical review on coherency-based dynamic equivalences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14):91-95.
- [25] 薛禹胜. 非自治非线性多刚体系统运动稳定性的定量分析:兼论电力系统暂态稳定性(续前)[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(2):1-5.
- XUE Yusheng. Quantitative study of general motion stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(2):1-5.
- [26] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.

作者简介:



刘兴华

刘兴华(1966),男,学士,工程师,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:xuehua-liu@sac-china.com);

魏繁荣(1991),男,博士,研究方向为电力系统保护控制和能量管理。

Quantitative analysis of power system coherency based on the single pendulum equation

LIU Xuehua¹, WEI Fanrong²

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. Department of Electrical, Computer and Biomedical Engineering, University of Rhode Island, Kingston 02881, RI, USA)

Abstract: The non-coherence of the disturbed power system may lead to inaccurate dynamic equivalence and affect the analysis of power system safety and stability. For this reason, a quantitative analysis method for power system coherence considering the influence of damping torque is proposed. Firstly, based on the single pendulum equation, it gives a derivation of the dynamic equivalent system period characteristic expression after the power system is disturbed, and the correlation between the dynamic equivalence and the coherence of the power system is discussed. Secondly, in the scenario of determined faults, a motion period estimation method is put forward based on the upper and lower boundaries in the rotor trajectory of the equivalent system. A quantitative index is proposed by comparing the estimated and the measured periods. Then, the influence of damping torque is deeply studied, and the quantitative evaluation index of system dynamic damping characteristics is proposed based on the estimation period. Finally, the simulation examples of two typical systems show that the methods and indicators proposed are effective and reliable, which provide a reference for evaluating the safety and stability of the power system.

Keywords: coherency; dynamic equivalence; single pendulum equation; trajectory; damping characteristics

(编辑 吴楠)