注:国家自然科学基金项目(NO.51477010) 摘要:运用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC,对复转矩系数法进行了时域仿真实现,并在实现 过程中作出改进,对遇到的问题做了全面的分析并给出可参考的标准。最后以 IEEE 第一标准测试 系统为研究模型,求取复转矩系数曲线,分析了线路串补度对电气阻尼的影响。分析结果可以为解 决电力系统因串联电容补偿而引起的次同步振荡问题提供一些参考。 关键词:PSCAD/EMTDC;复转矩系数法;次同步振荡;电气阻尼 中图分类号:TM712 文献标识码:A 文章编号:1006-883X(2018)02-0013-07 收稿日期:2017-10-17

# 基于 PSCAD/EMTDC 的复转矩系数法的 时域实现及对电气阻尼影响的研究

黄璐 李娟 刘晓建

北京信息科技大学自动化学院,北京 100192

## 一、引言

力系统次同步振荡(Sub-synchronous Oscillation, SSO)是指电力系统受到扰动导致偏移其平衡点 后,电网与汽轮发电机组之间在一个或多个低于系 统同步频率的固有频率交换能量而产生的一种状况或 现象<sup>[1]</sup>。

近几年来,我国一些大型电厂采用较高串联电容 补偿度的对网输电模式。由于存在串补输电、交直流 混合输电系统导致的次同步振荡,对电网和发电机组 造成重大威胁。

对 SSO 的分析方法主要有频率扫描法、特征值分 析法、复转矩系数法等。

频率扫描法主要是定性分析与筛选发电机组,筛 选出存在次同步振荡风险的机组,计算方法比较简单、 易懂且快速,但缺点是误差比较大<sup>[2]</sup>:

特征值分析法是小扰动分析法,其优点是理论严 密、分析准确度高,但缺点是存在严重的"维数灾难";

复转矩系数法是在特征值分析法的基础上发展起 来的方法,由 I. M. Canay 提出<sup>[3]</sup>,并建立了包括电气、 机械两部分的扭振方程以及稳定性判据,它也是基于 系统线性化原理的一种方法,但比特征值分析方法简 单,主要用于分析电力系统次同步振荡和轴系扭振<sup>[4-5]</sup>。

本文基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台对 复转矩系数进行实现研究,为了提高仿真精度,对实 现过程中作出了一些改进,并给出可参考的标准。以 IEEE 第一标准测试系统为研究模型,分析了线路串联 电容补偿度对电气阻尼的影响。

## 二、复转矩系数法的基本原理

复转矩系数法是一种频域分析方法,其主要基于 线性化模型。复转矩系数法的原理如下:



典型大型汽轮机的发电机组轴系一般有6个质量块,分别为 发电机、励磁机、高压缸、中压缸和2个低压缸,通常把这些质 量块视为集中质量块,每个质量块之间为无质量的理想弹簧连 接,形成多质量一弹簧系统,如图1所示。通常发电机轴系运动 方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 & i = 1, 2, \dots, 6\\ \tau \ddot{\delta} = T - K \delta - D \dot{\delta} \end{cases}$$
(1)

式中, $\boldsymbol{\delta}$ 一轴系质量块电气角位移, $\boldsymbol{\delta}=(\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4 \ \delta_5 \ \delta_6)^{\mathrm{T}}$ ,其中,  $\delta_5$ 为发电机转子的电气角位移;

 $\omega_i$ 一轴系第 i 个质量块的电气角速度,其中, $\omega_5$  为发电机转子的电气角速度;

ω<sub>0</sub>一运行状态稳定下的发电机的角速度;

 $\tau$  一轴系质量块惯性时间常数矩阵, $\tau$ =diag( $\tau_i, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6$ );

**T**一轴系质量块的转矩矩阵, **T**= $(T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6)^{\mathrm{T}}$ ;

**K**一发电机轴系的弹性系数矩阵,其中,K<sub>*i*,+1</sub>为相邻质量 块之间的弹性系数;

<b>K</b> =	$K_{12} - K_{12}$	$-K_{12} \\ K_{12} + K_{23} \\ - K_{23}$	$-K_{23}$ $K_{23} + K_{34}$ $-K_{24}$	$-K_{34}$ $K_{34} + K_{34}$	- <i>K</i> .,	
			34	- K <sub>45</sub>	$K_{45} + K_{56} - K_{56}$	$-K_{56}$ $K_{56}$

**D**一发电机轴系的阻尼矩阵,其中,D<sub>ii</sub>为第*i*个质量块的 自阻尼系数,D<sub>iii</sub>为相邻质量块之间的互阻尼系数。

 $D_{11} + D_{12}$  $-D_{12}$  $-D_{12}$   $D_{12} + D_{22} + D_{23}$  $-D_{23}$  $-D_{22}$  $D_{23} + D_{33} + D_{34}$  $-D_{34}$ D  $-D_{34}$ - D<sub>45</sub>  $D_{34} + D_{44} + D_{45}$ - D.,  $D_{45} + D_{55} + D_{56}$ - D.,  $D_{56} + D_{66}$ - D.,

首先,在运行点进行线性化,之后可得:

 $(\tau p^2 + Dp + K)\Delta \delta = \Delta T_M - \Delta T_e$ 

(2)

式中, p 一微分算子,  $p = \frac{d}{dt}$ ;

 $\Delta \delta$  一相邻质量块的电气角位移差;

 $\Delta T_e$  一电磁转矩增量;

 $\Delta T_M$ 一机械转矩增量。

忽略汽轮机出力变化,并消去发电机以外质量块转角可得: $k_m(p)\Delta\delta_5 + \Delta T_e = 0$  (3)

式中, k<sub>m</sub>(p) 一机械转矩系数;

 $\Delta \delta_5$ 一发电机电气角位移差。

定义等式(3)的第一项为"机械系统转矩增量",

 $\Delta T_m(p) = k_m(p) \Delta \delta_5$ ,其等效于轴系动态元件, 与轴系相对应的一个虚拟转矩增量,与式 (2)中的 $\Delta T_M$ 是两个不同的概念。式(3) 可以表示为:

$$\Delta T_m(p) + \Delta T_e = 0 \tag{4}$$

如果电磁转矩增量也满足线性化条件, 即可表示为: $\Delta T_e(p) = k_e(p) \Delta \delta_5$ ,则式(4)表示为:

$$[k_m(p)+k_e(p)]\Delta\delta_5(p)=0 \tag{5}$$

式中, $k_e(p)$ 一电磁转矩系数。

其次,同步频率λ下的相量形式为:

$$[k_m(j\lambda) + k_e(j\lambda)]\Delta \delta_5 = 0 \tag{6}$$

其中, k<sub>m</sub>(jλ)—机械复转矩系数;

 $k_e(j\lambda)$ 一电气复转矩系数;

 $\Delta \delta_{s}$ 一发电机电气角位移差的相量形 式,当发电机以频率 $\lambda$ ,幅值  $|\Delta \delta_{s}|$ 作等幅振 荡时,有 $\Delta \delta_{s} = |\Delta \delta_{s}| e^{j \lambda t}$ 。

则有:

 $k(j\lambda)=k_m(j\lambda)+k_e(j\lambda)=K(\lambda)+j\lambda D(\lambda)$  (7) 式中,  $k(j\lambda)$ 一总复转矩系数;

K(λ) 一弹性系数, 与转角变化同相;

λD(λ)一阻尼系数, 与转速变化同相。

根据式(7)可以判定轴系的稳定性, 其稳定判据为:

当  $D(\lambda)|_{K(\lambda)=0}>0$  时, 轴 系 稳 定; 当  $D(\lambda)|_{K(\lambda)=0}=0$  时,为临界阻尼,临界稳定。 当  $D(\lambda)|_{K(\lambda)=0}<0$  时,为负阻尼,轴系不稳定, 将在频率  $\lambda$  下产生发散振荡。

对于系统中频率为λ的振荡分量,可以 采用相量来表示前面的关系,即发动机电磁 转矩增量的相量形式为:

 $\Delta T_e(\lambda) = K_e(\lambda) \Delta \dot{\delta}_5 + D_e(\lambda) \Delta \dot{\omega}_5 \qquad (8)$ 

式中: $K_e(\lambda)$ 一电气弹性系数;

 $D_e(\lambda)$ 一电气阻尼系数;

Δ*ω*5一发电机电气角速度增量的相量 形式。

根据上述的稳定性判据时可知:当电

磁转矩增量  $\Delta T_e(\lambda)$  和发电机角速度增量  $\Delta \omega_5$  两者之间 的相位在 -90°~90° 之间,即相位在右半平面时,对应 的电气阻尼系数为正值,则发电机轴系稳定。反之, 当相位在左半平面时,电气阻尼系数为负值,发电机 轴系不稳定,将在次同步频率 $\lambda$ 下产生发散振荡。

将式(8)变形,可以得到:

$$\frac{\Delta T_e(\lambda)}{\Delta \omega_5} = D_e(\lambda) - j \frac{1}{\lambda} K_e(\lambda)$$
(9)

电气阻尼转矩系数  $D_e(\lambda)$  的值可以根据式(9) 求解,即:

$$D_e(\lambda) = \operatorname{Re}\left(\frac{\Delta T_e(\lambda)}{\Delta \omega_s}\right) \tag{10}$$

## 三、时域仿真实现步骤

根据定义可知,复转矩系数可以分为电气部分和 机械部分,对于电气复转矩系数有两种方法可以求出,

一种方法是可以通过系统的传递函数得到,另一种方法是通过曲线计算得到,而机械复转矩系数一般是利用系统的传递函数模型来计算,再根据稳定性判据来分析轴系是否稳定<sup>[4]</sup>。

由于次同步振荡频率远离工频,因此需要采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 来计算复转矩系数。

PSCAD/EMTDC 是一种时域仿真计算软件,其计 算原理为:首先对电力系统中表示每个元件中机械和 电气特性的微分方程,将其转化成差分方程,再利用 节点分析方法联立,并采用固定计算时间步长来求解 系统各运行变量在每一个计算时刻的瞬时值<sup>[6]</sup>。所采 用的计算方法以隐式梯形积分法为基础,该方法同时 包括了后退欧拉法的计算方法,两者结合达到了改善 计算过程的数值稳定性的效果。

以计算电气阻尼转矩系数为例,来说明 计算复转矩系数的时域计算方法。系统要求 发电机轴系模型采用单刚体模型,而且电气 部分采用完整的数学模型,具体时域仿真实 现步骤具体如下<sup>[5]</sup>:

(1)利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/ EMTDC 建立系统的电磁暂态仿真模型,并且 调试成功;

(2)当系统运行状态已经达到稳定后,在系统的 发电机的转子上即 PSCAD 所建模型的输入端 Tm 施加 一串频率为 f<sub>0</sub> 整数倍的小幅脉动激励转矩:

$$\Delta T_m = \sum_k T_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k)$$
$$= \sum_k T_k \cos(2\pi k f_0 t + \varphi_k) \qquad k \mathfrak{H} \mathfrak{B} \mathfrak{Y}$$
(11)

式中, $\varphi_k$ 一给系统施加脉动转矩的初相位;

*T<sub>k</sub>*一给系统施加脉动转矩的幅值,*T<sub>k</sub>*要求值较小,如果太大的话,就会导致系统非线性化,不满足假设条件。

(3)当待研究的系统运行状态再次达到稳定后, 截取脉动转矩一个公共周期内的发电机电磁转矩 T<sub>e</sub>和 发动机角速度 ω;

(4) 将上述截取得到的  $T_e$  和  $\omega$ , 依次进行 Fourier 分解, 即得出不同频率下的 $\Delta T_e$  和  $\Delta \omega$ ;

(5)根据式(10)可以得到激励频率下的电气阻 尼转矩系数 D<sub>e</sub>(kf<sub>0</sub>),从而可以判断系统的稳定性。

下面针对上述 5 个步骤依次讨论和分析各步骤的 具体执行。

#### 四、系统仿真模型的建立

本文所研究的系统为 IEEE 第一标准测试系统, 此系统主要用于次同步振荡的研究,如图 2 所示。系 统主要以 500kV 的传输系统和 892.4MVA 的发电机组 为基础,其模型轴系含有 6 个质量块,分别为励磁机 (EXC)、发电机(GEN)、高压缸(HP)、中压缸 (IP)、2 个低压缸(LPA 和 LPB)。

利用软件 PSCAD/EMTDC 中提供的标准模型库, 建立如图 3 所示的 IEEE 第一标准测试系统模型,其中





包括发电机、串联电容器、无穷大电源等模型,由于 发电机轴系需要采用单刚体模型,发电机模型需要忽 略多质量块。在建模过程中,其相关参数值见参考文 献[6],建模完整图如图3。

### 五、扰动模型的建立

幅值的大小会影响仿真精度,系统对接入的脉动 转矩幅值的要求较小,建议幅值为0.005~0.05之间, 一般取0.01pu。如果幅值太大的话,就会破坏系统可 线性化的前提条件。在加入脉动转矩的时候,需要考 虑两个问题:

(1)如果每次只加入一个频率值的小值脉动转矩的话,既费时又统计困难;

(2)选择一次性加入多个频率不等的脉动转矩时,则会造成各频率值之间相互干扰的后果,如下式:

$$\Delta T_m = \sum_{k=1}^{100} T_k \cos 2\pi k f_0 t \tag{12}$$

式中, f<sub>0</sub>一基频。

这里取f<sub>0</sub>=0.5Hz,因次同步振荡的频率最大为 50Hz,所以*k*最大取值为100,这样加入脉动转矩的 方法会导致叠加后的幅值较大,从而破坏了系统的可 线性化性。

综合上述问题,本文提出的方法是:在对系统同时加入扰动转矩前,先对各个频率分量的转矩进行处理,即加上一个滞后相位如下:

$$\Delta T_m = \sum_{k=1}^{100} T_k \cos(2\pi k f_0 t + \varphi_k)$$
  
= 
$$\sum_{k=1}^{100} T_k \cos(2\pi k f_0 t + \frac{\pi}{180} (k f_0)^n)$$
(13)

其中,  $\varphi_k = \frac{\pi}{180} (kf_0)^n$ 一滞后相位值, n值一般取 5。

图 4 是未加滞后相位的扰动波形和加了滞后相位 的扰动波形对比图。从图中我们可以看出,未加滞后 相位时,幅值已经达到 0.8pu,不满足要求。加了滞后





相位之后,扰动量的幅值减小了4倍左右,并且没有 破坏系统的可线性化条件。等式(13)中的n值取为 5,这样叠加的扰动信号会比较平缓,不破坏系统的线 性化条件。局部扰动模型细节见图5,图5中为扰动 模型15Hz~16Hz的建模图,其模块中的三个输入分别 为Phase(相位)、Mag(幅值)、Frep(频率)。

## 六、角速度增量标幺值 Δω 的求取

待系统运行状态再次稳定之后,截取发电 机同一个公共周期电气转矩 *T<sub>e</sub>*和发电机角速 度ω。本文所分析的算例中,系统的采样频率 为1000Hz,即采样公共周期为0.001s。软件 PSCAD/EMTDC 中输出的转速ω即为发电机角速 度的真实值,得到真实值之后要转换成标幺值, 再求取角速度增量的标幺值。在 PSCAD 上搭建 模型求取Δω如图6。图6中,*W*<sub>1</sub>为输出的发电 机角速度的真实值,377.0为基准角速度值(设 置工频f=60Hz,则基准电气角频率为 $2\pi f$ =377rad/s, 产生发电机基准转速真实值也为377rad/s), $W_2$ 即为 角速度增量的标幺值 $\Delta\omega$ :

$$\Delta \omega = W_2 = \frac{W_1}{377.0} - 1 \tag{14}$$

## 七、Fourier 分解以及电气阻尼系数的求取

软件 PSCAD 中的在线 FFT 模块如图 7,可以用于  $T_e$ 和  $\omega$  的 Fourier 分解,更直观、实时地观测每个频率下幅值(A)和相位值( $\phi$ )。

以 $\Delta \omega$ 为例,幅值相位建模如图7所示。FFT模 块参数设置时,考虑到次同步振荡频率为5Hz~50Hz, 所以参数设置的范围要涵盖次同步振荡频率范围,即 基频 $f_0$ 参数设置为0.5Hz,对应的谐波数设置为127, 则其频率范围为0Hz~63.5Hz,从0Hz~63.5Hz中选出 满足次同步振荡的各个频率分量。图7中,输出 $W_{2Mag}$ 和输出 $W_{2Ph}$ 分别为各个频率(0Hz~63.5Hz)下相对应 的幅值和相位值,图7中first-Ph、second-Ph、third-Ph 分别是第一、二、三次谐波(即0Hz、0.5Hz、1Hz) 对应的相位,这样可以清楚地知道某一谐波对应的相 位输出图,幅值也是类似。

软件 PSCAD 中包含在线 FFT 模块,本文运用此 模块来求取各频率下的幅值和相位,然后再利用式(15) 和式(16)需将其转化为对应的各频率下的Δ*T*。和Δω, 再由式(9)计算出电气阻尼系数。

$$\Delta T_e = A(T_e)\cos(\phi(T_e)) + jA(T_e)\sin(\phi(T_e))$$
(15)

$$\Delta \omega = A(\omega)\cos(\phi(\omega)) + jA(\omega)\sin(\phi(\omega)) \tag{16}$$



## 八、线路串补度对系统电气阻尼的分析研究

针对 IEEE 第一标准测试系统,分析研究串补度对 电气阻尼的影响,固定其他参数不变的前提下,系统 只改变串补电容值。取串补电容值分别为 21.977μF、 30.75μF、47.09μF,其所对应的串补度分别为 74.1%、 53%、34.6%,利用上述方法在待研发电机转子上,从 而可以得到电气复转矩曲线。三个线路串补度(74.1%、 53%、34.6%)对应的电气阻尼系数如图 8 所示。



由图 8 可见,当线路串补度为 74.1% 时,电气阻 尼系数在 11Hz~29Hz 区间为负,在 21Hz 附近达到最 小值,由于机械系统的正阻尼一般比较小,因此系统 的谐振频率的总阻尼为负,则说明此系统存在次同步 振荡不稳定问题。其它两种情况与此类似。

综合可以看出,当线路串补度分别为34.6%、 53%、74.1%时,串补度越大,系统阻尼系数峰值所对 应的电气频率越低,电气谐振点的负阻尼越大,则系 统潜在发生次同步振荡的危险性也就越高;反之,线 路的串补度越低,系统阻尼系数峰值所对应的电气谐 振频率越高,系统的电气谐振点负阻尼越小,发生次 同步振荡潜在的危险性相对越低。但是如果线路串补 度越低的话传输能力就会越小,因此应综合考虑各方 面的因素,选择最合适的线路串补度。

# 九、结论

本文基于复转矩系数法,运用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC对复转矩系数法进行了时域仿真实现, 并作出一些改进,在实现过程中遇到的一些问题做了 全面的分析并给出可参考的标准: 1、对于含串联电容补偿度的系统,系统接入脉动 转矩幅值的要求较小,建议取 0.01pu 左右。

2、考虑到快速性和满足不破坏系统的线性化的假 设条件下,在对系统同时加入扰动转矩前,对各个频 率分量的转矩都加上一个滞后相位。

最后以 IEEE 第一标准测试系统为分析模型,求 取电气复转矩曲线,分析了线路串补度对电气阻尼系 数的影响,线路串补度的值与电气谐振频率成反比, 即线路串补度越高,电气谐振频率会越低,对应的电 气谐振点的负阻尼也就越大,系统潜在发生次同步振 荡的危险性也就越高。

#### 参考文献

[1] 谢小荣,韩英铎,郭锡玖.电力系统次同步谐振的分析与 控制 [M].北京:科学出版社,2015.

[2] 赵立进,徐梅梅,顾威等.基于非线性分岔理论的分岔理 论的 HVDC 系统次同步振荡研究 [J].电力应用,2015,34(9): 44-47.

[3]I. M. Canay. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine, part I and part II[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3630-3647.

[4] 王晋, 郭春林, 肖湘宁等. 基于 PSCAD/EMTDC 的复转矩 系数法的实现 [J]. 华东电力, 2010, 38(12): 1854-1857.

[5] 朱鑫要, 孙海顺, 文劲字等. 基于 CPCM 的复转矩系数法 在电力系统 SSR 问题研究中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 2(5): 77-84.

[6] 程时杰,曹一家,江全元.电力系统次同步振荡的理论与 方法 [M].北京:科学出版社,2009.

[7] 王忠军,王林川,谢小荣等.一种综合频率扫描和复转矩系数法的次同步谐振风险定量估计方法[J]. 电网技术,2011,35(5):101-105.

[8] 吕士荣,刘晓鹏,郭强等.次同步谐振分析中复转矩系数 与特征值之间的关系 [J]. 电力系统自动化,1999,2(16):16-22. [9] 许建庭.复转矩系数扫描分析方法及阻尼特性研究 [D]. 华 北电力大学,2014.

[10] 曹澄沙,肖湘宁,张剑.一种阻断 HVDC 控制环节中次同步频率分量的方法 [J]. 电力建设, 2017, 38(1): 49-57.

[11] 江桂芬, 孙海顺, 陈霞. 宁夏多直流外送系统 SSO 特性分析及次同步阻尼控制器设计 [J]. 电工技术学报, 2017, 7(32): 30-38.

[12] 刘思嘉,黄赛男.低频振荡中电磁转矩系数的计算[J].电 子测试,2015,2(23):26-29. [13] 于云霞, 李娟. 基于特征值分析法的电力系统次同步振荡研 究 [J]. 电气技术, 2017, 4(23): 44-49.

Realization of complex torque coefficient method in time domain based on PSCAD/EMTDC and research on the influence on electrical damping

HUANG Lu, LI Juan, LIU Xiao-jian

(School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The simulation of the complex torque coefficient method in time domain is realized with the electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC, and improvements are made in the implementation process. Comprehensive analysis and reference standards for the problems encountered are given too. Finally, the complex torque coefficient curves are obtained with IEEE first standard test system as the research model. The influence of the series compensation of circuit on the electrical damping is analyzed. The analysis results can provide some references for power systems solving the problem of sub-synchronous oscillation caused by series capacitor compensation.

**Key words:** PSCAD/EMTDC; complex torque coefficient method; sub-synchronous oscillation; electrical damping

## 作者简介

黄璐:北京信息科技大学自动化学院,硕士研究生,研究 方向为电力系统次同步振荡分析及预警。 通讯地址:北京市海淀区清河小营东路12号 邮编:100192 邮箱:645714944@qq.com 李娟:北京信息科技大学自动化学院,副教授,博士,研 究方向为传感检测技术及其在电力系统中的应用研究。 刘晓建:北京信息科技大学自动化学院,硕士研究生,研 究方向为电力系统次同步振荡分析及抑制研究。