# 基于PSCAD/EMTDC的扭振保护封装及工程应用

刘智慧[1,2]，王新雷[1]，马实一[1]，王莹莹[2]，赵伟华[2]

（1. 国网北京经济技术研究院，北京 102209；2. 北京四方继保自动化股份有限公司，北京 100084）

**摘要：**电厂送出输电线路的串联电容补偿、直流输电和电力系统稳定器的不当加装，发电机励磁系统、晶闸管控制系统和电液调节系统的反馈作用等，均有可能诱发、导致次同步振荡/次同步谐振，严重情况可引起发电机汽轮机扭振保护动作。在PSCAD/EMTDC上利用仿真平台自带的自定义建模功能，使用Fortran语言建立了汽轮机扭振保护模型，并对其仿真结果与北京四方继保自动化股份有限公司实际装置测试结果进行了比较，仿真表明数字扭振保护的仿真结果是可信的。将某多机带串补远距离输电电厂送出仿真得到的次同步谐振时机组转速的模态衰减曲线作为数字扭振保护装置的输入，仿真得到扭振保护切机结果，形成了一、二次的闭环仿真分析。仿真得到了电厂多机在不同运行方式扰动下的扭振保护动作情况，同时针对SN曲线两组不同整定值进行了计算，为电厂送出实际运行方式选择以及扭振保护的整定提供了参考。

**关键词：**自定义建模；扭振保护；PSCAD仿真；工程应用

## The package of torsional vibration protect based on PSCAD/EMTDC and its application in projects

LIU Zhihui[1,2], WANG Xinlei[1], MA Shiyi[1], WANG Yingying[2], ZHAO Weihua[2]

( 1. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., 100084 Beijing, China)

**Abstract:** Power transmission line sent with the series capacitor compensation, DC transmission, power system stabilizer of improper installation of the generator excitation system, thyristor control system, feedback electro-hydraulic control system, etc., are likely to induce, lead to sub-synchronous oscillation / SSR, severe cases cause the turbine generator torsional vibration protection action. On PSCAD using its own custom modeling capabilities in Fortran development, a digital protection torsional vibration model is established and the simulation results are compared with their true means. Digital simulation show that the protection of the torsional vibration simulation results are credible. which is simulated sent Sub-synchronous resonance unit speed modal attenuation curve a multi-machine with Series Compensation long-distance transmission plant is as a digital input device torsional vibration protection, protection of the torsional vibration cutting machine result is simulated, a primarg secondary the closed-loop simulation analysis is formed, power plant multi-machine in different operating modes of torsional vibration protection action cases is got, the SN curve two different setting values are calculated, the power plant actual operation mode selection and the torsional vibration protection setting are provided as a reference.

**Key words:** custom modeling; torsional vibration protection; PSCAD simulation; projects application

## 0 引言

近年来，随着电力系统电压等级的不断提升以及输配电技术的发展，大规模交直流混合输电已成为电网的主要趋势。为了提高远距离输电系统传输容量和系统稳定性，可控串补技术在电网中得到广泛应用；电厂送出输电线路的串联电容补偿、直流输电和电力系统稳定器的不当加装，发电机励磁系统、晶闸管控制系统和电液调节系统的反馈作用等，均有可能诱发、导致次同步振荡/次同步谐振。由于汽轮机和发电机转子惯性较大，对轴系本身的低阶扭转模态十分敏感，呈低周高应力的受力状态。这种机电共振直接威胁着发电机组和电网的安全可靠运行。为保护发电厂汽轮机的安全，电厂一般针对这种情况安装汽轮机扭振保护。在电力系统发生扰动后，多机电厂在送出发生次同步谐振/次同步振荡情况下，会引起多台机组的扭振现象。这时需要对机组的运行方式及切机方案进行综合比较分析，以保障电厂的可靠及经济运行。一般的方法是借助仿真手段建立反映电厂送出次同步谐振/次同步振荡的精准的仿真模型，目前PSCAD/EMTDC是国内公认的能精确仿真次同步谐振的平台。在仿真模型建立后，可在模型上模拟电厂各种运行工况下的各种扰动，进而得到机组的转速曲线。经过仿真滤波提取可以得到扰动下机组各个模态的转速曲线，而在这些情况下扭振保护的动作情况如何无法知道，切机情况只能根据模态曲线幅值及趋势依据经验和复杂的计算来判断保护是否切机，无法通过闭环的仿真得到确切结果。为了得到准确的扭振保护切机结果，本文将扭振保护算法封装至PSCAD仿真平台，以形成一、二次的闭环仿真，进而得到各种运行方式下的切机方案。同时仿真保护模型还可以针对不同SN曲线整定值仿真，为电厂实际运行方式选择以及扭振保护的整定提供了参考。

PSCAD/EMTDC是使用最广泛的电磁暂态仿真程序之一。为了满足用户不同的应用要求，提高仿真的灵活性，PSCAD/EMTDC为用户提供了自定义建模的功能。该功能为建立精确、详细的继电保护模型提供了解决思路。该功能主要有以下几个优势：

1）为了对模型保密可通过自定义元件库的Library（*.lib）文件间接地实现元件层面的封装，使其他用户无法查看及修改自定义库中的源代码，具备一定的源代码安全保密性。

2）自定义元件的核心功能完全由编程实现，不受已有元件功能的制约，具有更好的内嵌性能与更高的执行效率。

3）自定义元件的面板功能为用户提供了一种统一、规范和便捷的参数输入形式，且在自定义库加载元件库后，用户可方便地将自定义元件通过拖曳与复制应用于任一工程文件，具有良好的可移植性。

本文利用PSCAD的自定义建模技术以上特点对汽轮机扭振保护进行了封装，并通过与四方继保扭振装置仿真结果比对验证了数字扭振保护模型的准确性，同时将该模型用于某电厂送出的切机及运行方式分析中，为解决工程实际问题提供了指导建议。

## 1 四方扭振保护的自定义建模

### 1.1 自定义建模的实现形式

PSCAD/EMTDC目前可与Fortran、C 和MATLAB三种语言编写的代码或程序进行接口，自定义元件实质上是其与外部程序进行接口的载体。为了提高代码的运行效率，采用直接嵌入的方式将用户自定义的代码加入到EMTDC中，即把用户代码直接作为子程序的一部分嵌入到 EMTDC 主程序中。本文为了达到较快的仿真速度以及方便程序接口，使用了Fortran语言作为自定义建模语言。

### 1.2 四方继保扭振保护装置原理

汽轮发电机轴系扭振保护装置对电厂运行中的机组提供监测与保护功能。当送出系统出现扰动时，可以根据计算出的轴系扭振响应，

依据机组的扭应力－寿命(S－N曲线)估算出汽轮机轴系的疲劳损耗百分数。若总的损耗达到100%，意味着该机组轴系的预期寿命已经损耗，存在着断裂的可能性。此时，保护动作停机对各联轴器螺栓进行检修更换就很有必要。当发生次同步谐振故障时，对扭振信号特征进行识别，采用发散判断为主疲劳与否来决定是否跳闸。保护装置信号处理流程如图1所示。

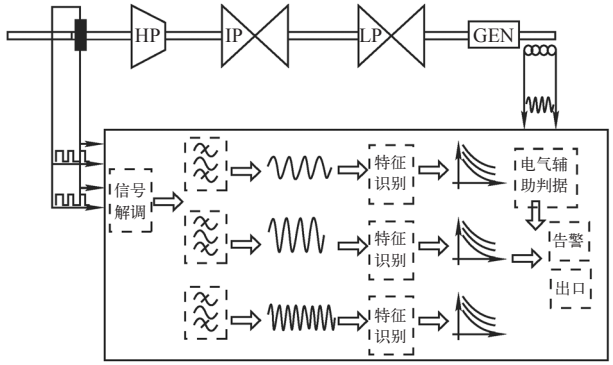



图 1　扭振保护信号处理流程

Fig. 1 Signal processing flow of torsional vibration protection

该装置有扭振模态发散、疲劳反时限两种保护功能。其中扭振模态发散保护功能通过实时测量发电机组轴系转速差提取各模态特征量，根据一段时间内的模态特征量相对变化趋势判别扭振模态是否发散或收敛，是汽轮发电机组轴系扭振保护的核心判据。而疲劳反时限保护作为辅助保护功能，通过计算出的轴系扭振响应，依据机组的扭应力－寿命(S－N曲线)计算出轴系危险截面的疲劳损耗百分数。实时累计单次扰动下的轴系各段的疲劳，当单次扰动下的疲劳实时累计达到疲劳定值后，TSR出口跳闸。扭振保护装置的逻辑图如图2所示。

### 1.3　扭振装置的仿真模型实现

根据实际装置的算法实现流程，仿真算法使用Fortran语言逐步实现了每个功能模块。仿真算法为克服仿真平台的步长与实际装置步长不一致引起的误差，修改了数据处理部分算法以及取采样值的原则。其他采用与实际装置一致的模块化的思路，从滤波器的设计到采样值处理，然后到保护定值读入，再到实现发散保

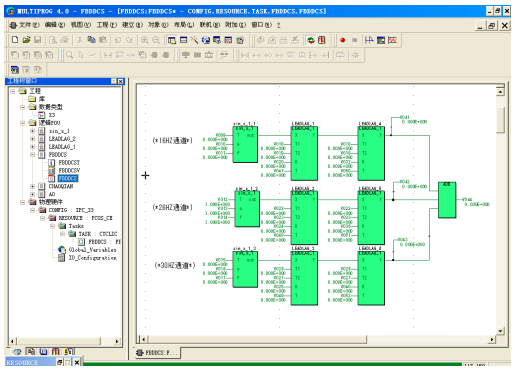


图 2　扭振保护逻辑框图示意图

Fig. 2 Logic block diagram of torsional vibration protection

护、疲劳保护和极限疲劳等算法。经过反复测试，比较每一步与实际装置的计算结果，校验仿真与实际装置的差异。图3为封装后的扭振保护，为方便分模块调试，大模块里面还有多个模块，比如数据处理模块、疲劳计算模块、发散模块和极限模块等。图3给出了仿真保护模型的数据流以及封装后模型的输入输出。左边3个模块是经过滤波后的机组的3个模态转速曲线，根据PSCAD平台的步长以及装置对数据的处理周期还原仿真保护模型装置需要的输入数据；右边的模块是仿真的扭振保护模型，TSR.df90.f是编译后的扭振保护程序。这样实现了程序的保密，模块的输入输出是可以自定义的。为了仿真方便，输出的结果有限，主要包括汽轮机轴系各处的疲劳值、保护起动、跳闸信号以及模态发散或收敛信号。

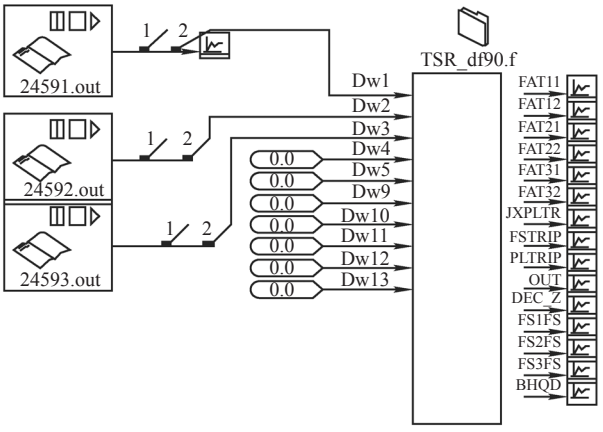



图 3　仿真扭振保护的数据流及模型输入输出

Fig. 3 Data flow and model input and output of simulation torsional vibration protection

### 1.4 扭振仿真模型的可信度验证

使用现场扭振保护装置跳闸得到的现场录波数据作为数据源，得到仿真装置和实际装置的计算结果，对比结果如表1所示。可以看出封装的扭振保护仿真模型无论从疲劳值的计算还是跳闸时间与仿真装置基本相符，这个准确度是可以接受的，仿真扭振保护模型是可信的。

表 1 扭振封装仿真模型与实际装置疲劳计算值对比

Tab.1 Comparison between simulation model of torsional vibration package and fatigue calculation value of actual device

| | 现场录波数据第一组 | 现场录波数据第二组 | 现场录波数据第三组 | 现场录波数据第四组 | 现场录波数据第五组 |
|---|---|---|---|---|---|
| 断面 3 截面 2 的疲劳值 | 0.000 1 | 0.000 5 | 0.046 9 | 0 | 0 |
| | 0.000 1 | 0.000 5 | 0.034 2 | 0 | 0 |
| 断面 3 截面 1 的疲劳值 | 0.000 3 | 0.001 9 | 0.087 2 | 0.000 1 | 0.000 1 |
| | 0.000 2 | 0.001 1 | 0.076 2 | 0.000 1 | 0 |
| 断面 2 截面 2 的疲劳值 | 0.002 6 | 0.001 2 | 0.150 4 | 0.000 2 | 0.000 7 |
| | 0.002 1 | 0.000 4 | 0.128 9 | 0.000 2 | 0.000 6 |
| 断面 1 截面 1 的疲劳值 | 0.182 1 | 0.037 1 | 1.072 8 | 0.010 5 | 0.036 3 |
| | 0.165 3 | 0.027 | 0.948 1 | 0.008 3 | 0.034 1 |
| 发散保护跳闸时间 | 0.749 | 0.708 | 0.449 | 0.703 | 0.649 |
| | 0.599 | 0.604 | 0.607 | 0.809 | 0.601 |
| 疲劳保护跳闸时间 | 0.748 | 0.749 | 0.599 | 5.199 | 0.899 |
| | 0.642 | 0.655 | 0.555 | 5.399 | 0.646 |
| 极限疲劳保护跳闸时间 | 2.449 | 无 | 0.849 | 无 | 无 |
| | 2.697 | 无 | 1.055 | 无 | 无 |

## 2 扭振保护仿真模型的工程应用

### 2.1 次同步谐振送出模型及仿真结果

目前对电厂送出的次同步谐振问题的研究，一般是建立电厂送出的仿真模型通过扰动来分析次同步谐振的程度，根据经验来判断切机台数，无法精确地知道保护切机时间和切机台数。另外扭振保护装置的汽轮机轴系的S－N曲线的整定值和材料的概率S－N曲线是疲劳可靠性设计基础与依据之一。概率S－N曲线本质上是在最佳拟合曲线（即均值S－N曲线）的基础上，考虑误差的随机性建立的。S－N曲线拟合后定值的整定对汽轮机扭振下疲劳计算影响比较大，基于现有的扭振保护的仿真模型，可以针对现场的模态曲线来得到不同的S－N曲线对保护跳闸的影响，进而对定值的整定进行综合考虑。

清华大学针对某六台机运行的电厂串补输电系统次同步谐振建立了送出模型，该模型还包含了抑制次同步的控制模型，并针对220 kV故障在六台机的各种不同运行方式下进行了仿真分析，经过试验验证可知，该模型是具有仿真可信度的。根据该模型仿真得到的各种运行方式下机组的模态转速数据，基于现有的仿真扭振保护模型可以得到各种运行方式下的切机方案，可分析采用不同的S－N曲线整定值对TSR保护动作的影响。

图4～图6为汽轮机转速的模态输入曲线。

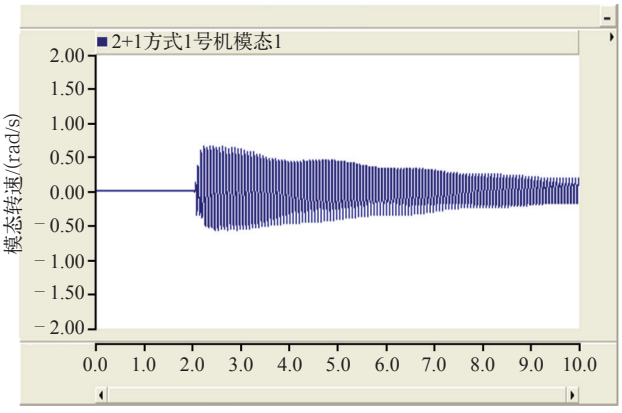



图 4 1 号机模态 1 曲线

Fig. 4 Mode 1 curve of unit 1

通过模态曲线输入经过仿真模型可以得到保护动作时间曲线以及轴系各处的疲劳值。

图7、图8为仿真跳闸曲线，表2、表3给出

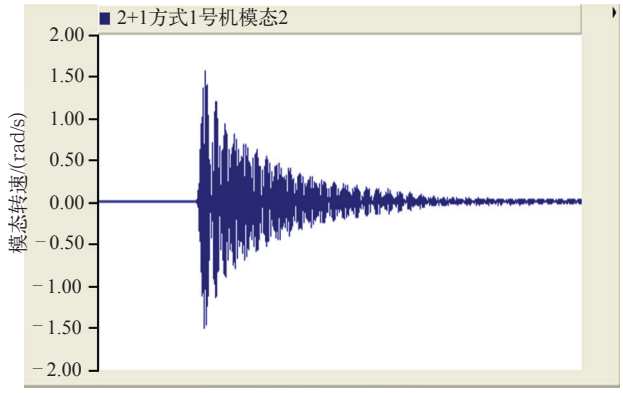



图 5　1 号机模态 2 曲线

Fig. 5 Mode 2 curve of unit 1

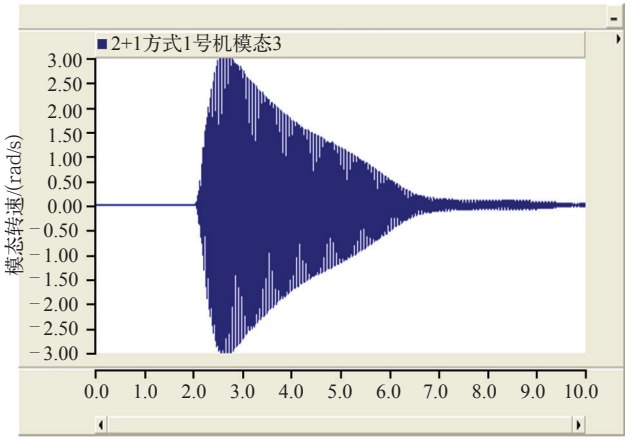



图 6　1 号机模态 3 曲线

Fig. 6 Mode 3 curve of unit 1

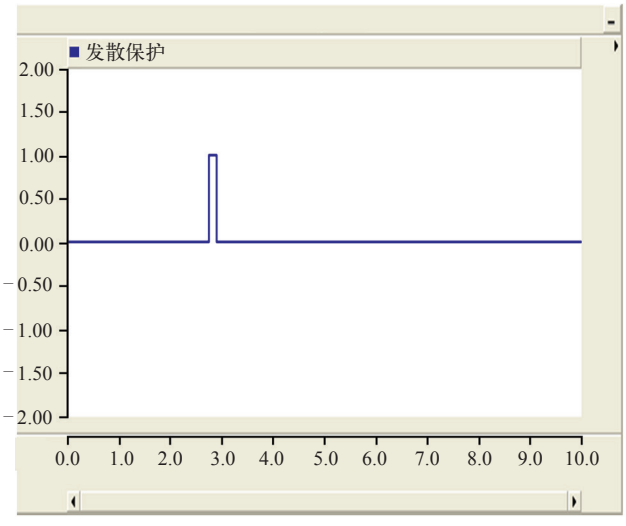



图 7　发散保护跳闸曲线

Fig. 7 Trip curve of divergent protection

了两组不同的S－N曲线的整定值对疲劳及跳闸时间的影响。

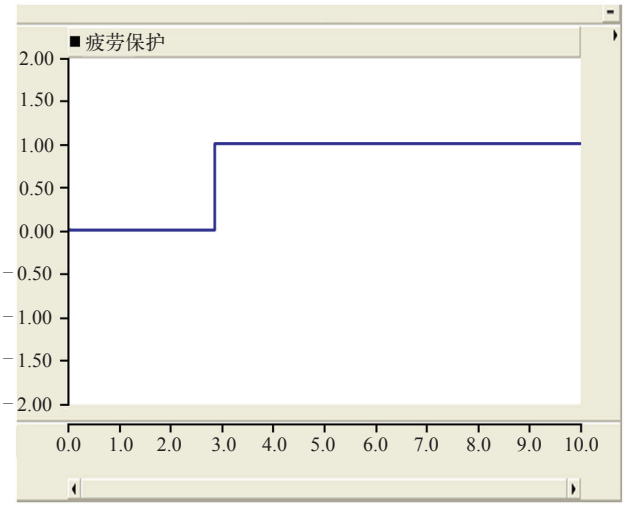



图 8　疲劳保护跳闸曲线

Fig. 8 Trip curve of fatigue protection

表 2　仿真疲劳计算结果

Tab. 2 Simulation fatigue calculation results

| 疲劳 | 7#瓦位置累计疲劳值（%） | 6#瓦位置累计疲劳值（%） | 5#瓦位置累计疲劳值（%） | 2#瓦位置累计疲劳值（%） | 最大疲劳累计2#瓦处的疲劳值（%） |
|---|---|---|---|---|---|
| S－N曲线 1 | 0 | 0.01 | 0.09 | 3.03 | 3.03 |
| S－N曲线 2 | 0 | 0 | 0.01 | 1.16 | 1.16 |

表 3　仿真保护跳闸时间结果

Tab. 3 Tripping time results of simulation protection

| 保护跳闸时间 | 发散保护跳闸时间/s | 疲劳保护跳闸时间/s |
|---|---|---|
| S－N 曲线 1 | 0.649 | 0.749 |
| S－N 曲线 2 | 0.649 | 1.399 |

## 2.2　仿真结论

通过大量的仿真，根据扭振仿真保护模型得到各种运行方式下的切机情况，从表2、表3分析结果来看，无论采用哪种S－N曲线整定方式，即在“4+1”“2+1”“4+0”三种方式下都有机组跳闸，第一组S－N曲线一定程度上减小了危险截面的疲劳累计，进而推迟了跳闸时间，这仅限于疲劳保护，对发散保护影响不大。各种运行方式下最大疲劳累计值均发生在轴系的2#瓦处。“2+1”方式下5号机的疲劳累计最为严重，“4+1”方式下1号机的情况对比

其他方式要好一些，在S－N曲线整定保守可避免TSR跳闸发生。

## 3 结束语

本文通过对采样算法以及数据处理修改，将扭振保护算法封装至PSCAD仿真平台，并对比了真装置与仿真扭振保护的计算结果。将电厂送出扰动下仿真得到的机组模态曲线输入仿真保护模型，形成了一、二次的闭环仿真，进而得到电厂各种运行方式下针对不同S－N曲线整定值的扭振保护切机情况，为电厂运行方式选择以及扭振保护的整定提供了参考。

### 参考文献


[1] 北京四方继保自动化股份有限公司．CSC-812P系列汽轮发电机组轴系扭振保护装置说明书[Z]．2010．

[2] 刘永浩，蔡泽祥，李爱民．PSCAD/EMTDC自定义建模及在直流线路保护仿真中的应用[J]．电力系统保护与控制，2011，39(9)：119-124．

[3] 蔡云峰，徐洋，潘琪．基于自定义模型的变压器纵差动保护PSCAD仿真[J]．电力系统保护与控制，2015，43(3)：118-122．

[4] 张民，贺仁睦，孙 哲，等．基于PSCAD/EMTDC的直流控制保护系统仿真平台及其在直流工程中的应用[J]．电力系统保护与控制，2013，41(3)：112-117．

[5] 刘超，蒋东翔，谢小荣，等．次同步振荡引起的发电机组轴系疲劳损伤[J]．电力系统自动化，2010，34(15)：19-22．

[6] 肖异，尹项根，张哲，等．PSCAD/EMTDC程序与继电保护仿真模型接口技术及应用[J]．电力自动化设备，2006，26(11)：67-70．

[7] 朱瑜，梁旭，闵勇．基于PSCAD/EMTDC的高压直流输电线路保护仿真研究[J]．现代电力，2006，23(2)：35-38．

[8] 林良真，叶林．电磁暂态分析软件包PSCAD/EMTDC[J]．电网技术，2000，24(1)：65-66．

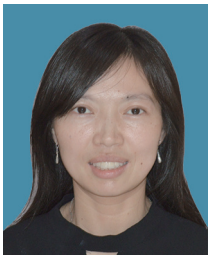
[9] 徐政，罗惠群，祝瑞金．电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]．电网技术，1999，23(6)：36-39．

[10] 孙和泰．大型汽轮发电机组的轴系扭振探讨[J]．热力发电，2004，33(1)：39-44．

[11] 谢诞梅，戴义平，等．汽轮机原理[M]．北京：中国电力出版社，2012．



作者简介



刘智慧

刘智慧（1982－），女，硕士，高级工程师，研究方向为电力系统仿真及继电保护。


（收稿日期：2019－06－15）EA