

超高压电网全过程振荡仿真新模型研究

章启明,乐全明,费铭薇,王忠民,周岚,张沛超,郁惟镛

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要: 超高压电网振荡模型的准确设计是进行振荡与故障识别算法研究的前提。提出并论证了超高压电网振荡频率变化连续且可导原理,设计出具有连续可导性质的电网振荡频率函数,重新设计了振荡初始与复归阶段的频率变化函数,尤其在振荡复归阶段,使用具有衰减特性的反双曲函数来模拟振荡频率逐步衰减,直至恢复正常的过程。通过典型算例验证了该新模型的有效性。

关键词: 继电保护; 故障诊断; 电网; 振荡模型

中图分类号: TM77; TM835

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)09-0013-03

0 引言

超高压电网仿真振荡模型的建立是进行故障与振荡识别理论研究的基础,该模型需尽量符合电力系统实际。电网距离保护振荡闭锁装置中振荡与故障识别算法的研究,以及子站端基于模拟量的故障诊断研究,都需要建立振荡仿真模型。

现有诸如 EMTP, EMDC, Matlab 等电力系统仿真软件,均缺乏有针对性的面向继电保护和故障诊断等特殊问题的振荡发生模型^[1]。文献[2]根据录波数据建立了一种基于 EMTP 的系统振荡模型,但该模型只包括起振和达到最快振荡周期两个时段的仿真,而没有研究后续的振荡衰减、拉入同步、最终止息的振荡复归过程,所用模型对系统振荡中的频率定义不够周全,削弱了模型的真实性和文献[1]在文献[2]的基础上完善了振荡各个阶段频率变化过程,通过引入双频制,解决相位不突变,乃至振荡复归时频差为 0 的问题。但该方法必须通过实际振荡频率与时间的乘积来形成相角,方能保证频率的平稳过渡。

基于此,本文在文献[1]振荡模型基础上,提出并论证了振荡频率变化连续且可导原理,设计了一种更加完善的全过程系统振荡模型,通过直接对频率积分形成相角,避免了文献[1]中因直接将频率与时间相乘形成相角。该模型对振荡与故障识别研究具有重要意义,并大量仿真与实际应用证明了本文振荡仿真模型的正确性。

1 振荡模型频率变化分析

文献[1]指出系统振荡频率必须连续。并认为,由于电力系统原动机力矩和电磁力矩均不可能

为无穷大(这符合电力系统实际),系统频率在 f_{80} 不可能出现间断。本文在其基础上,提出了系统振荡频率分段函数 $f(t)$ 连续可导仿真分析模型。

假设由于功角突变或其他暂态过程所引起频率振荡,对单机无穷大系统中的发电机组而言,其运动方程应满足:

$$J \frac{dw}{dt} = 2 J \frac{df}{dt} = TM - TE \quad (1)$$

式中: TM 为原动机施加的力矩, TE 为平衡电磁力矩, J 为发电机和原动机的综合惯性, w 为角速度, f 为频率。

电力系统在额定工况下,所有发电机以额定转速同步运行。系统频率与发电机转速成正比,当原动机的输入功率与发电机输出的电磁功率相平衡时,能维持发电机额定转速(频率)。根据华东电网实际运行经验表明:超高压电网发生振荡时,其最快振荡频率不会超过 7 Hz,否则系统将崩溃。所以,系统振荡时,原动机力矩和电磁力矩均不可能为无穷大,并且,这 2 个力矩差值变化过程可理解为连续变化;发电机转速、电源相角也不可能发生绝对性的突变,导致间断跃变。因此,假设在 t_i 时刻振荡频率发生变化,要求瞬时频率在 t_i 时刻连续,即 $f(t_i - 0) = f(t_i + 0)$ 。因此,要求振荡时电源实际频率在拐点前后必须连续。

系统功率平衡不能维持时,功率不平衡量将转换为速度(频率)偏差,即转换为全系统机组的动能形式。功率缺额将导致发电机转速(频率)下降并转移为动能供出;功率过剩将导致发电机转速(频率)升高,并转换为动能储存。可将公式(1)求得:

$$J \frac{d^2w}{dt^2} = 2 J \frac{d^2f}{dt^2} = \frac{d(TM - TE)}{dt} \quad (2)$$

由于能量的转换有限且连续,因此要求公式(2)中 $\frac{df}{dt}$ 在 t_i 瞬时连续,否则, $\frac{d(TM-TE)}{dt}$,实际上,原动机力矩和电磁力矩之差瞬时变化不可能为无穷大,由此,系统频率变化可理解为连续且可导。

2 振荡新模型频率变化方程

由于系统振荡频率变化函数 $f(t)$ 连续可导,设经过一极短时间,振荡角的变化为 $w = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} 2f(t) dt$,系统振荡频率的变化在 Δt 时间内光滑连续,则瞬时振荡频率 $\frac{dw}{dt}$ 近似表示为 $2f(t)$ 。

以下讨论振荡过程的5个阶段划分和特点:

第一阶段:本文设计在 $t_0=0$ 时刻,由正常状态向振荡状态过渡直至两侧电源振荡角达 180° 。文献[2]中,设计振荡频率 $f=a$ 的线性模型,该模型在 $t=0$ 时刻满足振荡频率连续变化,即 $f_{0-}=f_{0+}$,但并不满足振荡频率曲线光滑可导,即 $f_{0-}' \neq f_{0+}'$ 。因此本文设计频率变化函数 $f_1=a^2 t^2 (t \geq 0)$,该频率变化率为时间的二次函数。在 $t_0=0$ 瞬时振荡频率连续,且振荡频率的一阶导数也为0。频率变化函数曲线在 $t_0=0$ 时刻光滑连续,保证了系统由正常状态平稳过渡到振荡状态,该模型符合实际电力系统振荡情况。

设系统由 $t_0=0$ 时刻发生振荡到系统振荡角为 180° 的时间为 t_{180° 。并设 $t_{180^\circ}=0.5$ s, θ_0 为振荡初始角, f_0 为额定频率50 Hz。则系数 a 计算式为:

$$a = \frac{3(f_0 t_{180^\circ}^3 - \theta_0)}{4 f_0 t_{180^\circ}^3} \quad (3)$$

第二阶段:系统振荡角在达到 180° 后,设在 t_{180° 时刻系统频率以二次函数加速振荡: $f_2=b_1 t^2 + b_2 t + b_3$,且假设在 t_2 时刻达到频率差为 f_{20} 。在 t_{180° 时刻要求系统振荡满足 $f_1(t_{180^\circ})=f_2(t_{180^\circ})$, $f_1'(t_{180^\circ})=f_2'(t_{180^\circ})$,则其系数计算方程组为:

$$\begin{bmatrix} t_{180^\circ}^2 & t_{180^\circ} & 1 \\ 2t_{180^\circ} & 1 & 0 \\ t_2^2 & t_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a t_{180^\circ}^2 \\ 2a t_{180^\circ} \\ f_{20}/100 \end{bmatrix} \quad (4)$$

第三阶段:假设在 t_2 时刻系统振荡频率继续加快,以三次函数变化: $f_3=c_1 t^3 + c_2 t^2 + c_3 t + c_4$,该阶段模拟频率快速变化直至达到最大振荡频率的过程。同时假设在 t_{max} 时刻频率差达到最大值 f_{max} ,在

振荡频率最大时刻, $f(t_{max})=0$,在 t_2 时刻系统振荡频率满足 $f_2(t_2)=f_3(t_2)$, $f_2'(t_2)=f_3'(t_2)$ 。此时方程系数计算表达式为:

$$\begin{bmatrix} t_2^3 & t_2^2 & t_2 & 1 \\ 3t_2^2 & 2t_2 & 1 & 0 \\ t_{max}^3 & t_{max}^2 & t_{max} & 1 \\ 3t_{max}^2 & 2t_{max} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{20}/100 \\ 2b_1 t_2 + b_2 \\ f_{max}/100 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

第四阶段:当频率由最高点处开始缓慢衰减时,可设计为一个二次函数变化频率表达式: $f_4=d_1 t^2 + d_2 t + d_3$,设在 t_3 时刻,频率达到 f_{30} ,同理,在 t_{max} 时刻满足 $f_3(t_{max})=f_4(t_{max})$, $f_3'(t_{max})=f_4'(t_{max})$ 。此时确定方程系数计算式为:

$$\begin{bmatrix} t_{max}^2 & t_{max} & 1 \\ 2t_{max} & 1 & 0 \\ t_3^2 & t_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{max}/100 \\ 0 \\ f_{30}/100 \end{bmatrix} \quad (6)$$

第五阶段:为系统频率的复归过程。文献[1]认为该阶段振荡频率以 $f_5=e_1 t^2 + e_2 t + e_3$ 二次函数形式变化。该模型在振荡结束 t_4 时刻可以满足 $f_5(t_4)=0$,但不满足 $f_5'(t_4)=2e_1 t_4 + e_2 = 0$,不能实现振荡频率逐步衰减为0,系统以额定频率稳定运行。因此本文采用具有衰减特性的反双曲线函数,系统频率不断下降,在最终结束时刻 t_4 达到0,并且频率的导数也为0,保证振荡频率在 t_4 时刻为0。所以,

设系统振荡频率为 $f_5 = \frac{e_1}{t} + \frac{e_2}{t} + \frac{e_3}{t} + e_4$,此时系统振荡频率满足 $f_4(t_4)=f_5(t_4)$, $f_4'(t_4)=f_5'(t_4)$ 。确定方程系数的方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{t_4^3} & \frac{1}{t_4^2} & \frac{1}{t_4} & 1 \\ -\frac{3}{t_4^4} & -\frac{2}{t_4^3} & -\frac{1}{t_4^2} & 0 \\ \frac{1}{t_4^3} & \frac{1}{t_4^2} & \frac{1}{t_4} & 1 \\ -\frac{3}{t_4^4} & -\frac{2}{t_4^3} & -\frac{1}{t_4^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{30} \\ 2d_1 t_4 + d_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 仿真验证

以图1华东电网实际双端电源等效拓扑为例加以仿真说明。

设上述频率变化过程中,方程参数 $t_{180^\circ}=0.5$ s, $t_2=1.0$ s, $t_{max}=1.5$ s, $t_3=2.0$ s, $t_4=3.0$ s, $f_{20}=8.0$, $f_{max}=12.5$, $f_{30}=9.8$ 。

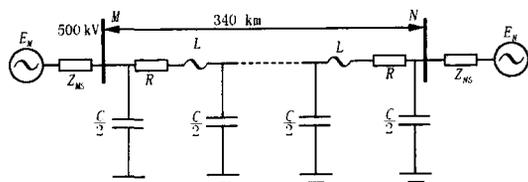


图 1 等效双端电源线路

Fig 1 Equivalent circuit of double-source power supply

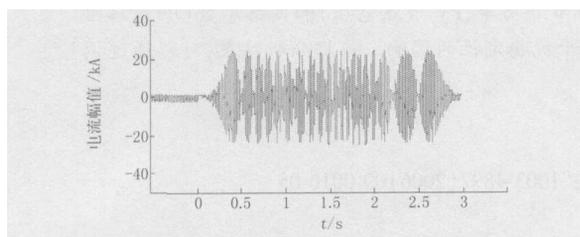


图 2 发生功角突变的振荡电流波形

Fig 2 Current oscillation waveform after abrupt change of power angle

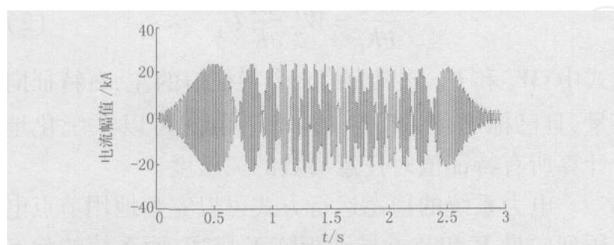


图 3 1.5 s发生振荡切机的振荡电流波形

Fig 3 Current oscillation waveform after power removal at 1.5 s

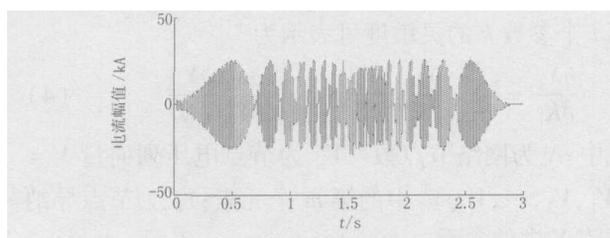


图 4 振荡中发生对称故障的电流波形

Fig 4 Current oscillation waveform when symmetrical fault occurs at swing center

图 2、图 3 和图 4 分别为振荡功角突变、振荡切机和振荡中发生对称故障时的电流波形。由波形图可见,振荡功角突变和振荡切机对振荡波形影响不大,而振荡中发生对称故障时,将对原振荡波形带来较大奇异,这符合电力系统实际。

4 结论

本文在现有振荡仿真模型基础上,详细分析了超高压电网振荡频率变化特性。提出了振荡全过程的 5 阶段改进仿真模型。通过仿真表明了本文新振荡模型的有效性。

参考文献:

- [1] 林湘宁,刘沛,等.面向继电保护的全过程系统振荡仿真[J].电力系统自动化,2003,27(22):56-59.
LN Xiang-ning, LU Pei, et al. Complete Power System Oscillation Simulation for Relay Protection Research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 56-59.
- [2] 孔繁鹏,葛耀中.一种用于测试保护的系统振荡模型[J].电力系统自动化,1995,19(8):38-42.
KONG Fan-peng, GE Yao-zhong. A Power Swing Model for Testing Protection Equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(8): 38-42.

收稿日期: 2005-10-14; 修回日期: 2005-11-07

作者简介:

章启明(1970-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;E-mail: yqm8341@sjtu.edu.cn

乐全明(1974-),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护及其软件工程;

费铭薇(1981-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护及其软件工程。

Research of complete power network oscillation simulation model

ZHANG Qi-ming, YUE Quan-ming, FEI Ming-wei, WANG Zhong-min, ZHOU Lan, ZHANG Pei-chao, YU Wei-yong
(Academy of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A new design concept that both the oscillation frequency function and its derivation should be continuous is proposed. Based on this principle and the investigation of frequency variations during the transient process, the frequency diversification function during start-up stage and recover stage is reconsidered, especially that a negative-double-curve function with the attenuation characteristic is utilized to construct the frequency function of the recover stage. The oscillation frequency simulation is validated during some typical experiment.

Key words: relaying protection; fault diagnosis; power network; oscillation simulation