

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.04.042

电力系统故障对水轮发电机组转子-轴承系统 稳定性影响分析

温倩, 马震岳

(大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为探索水电站水力、机械、电力各系统耦联条件下,水轮发电机组振动的动态特性,本文运用模块化建模方式,利用 MATLAB/SIMULINK 仿真工具建立了水力发电系统各子系统的模型,然后将各个元件模型搭建成耦合仿真系统。据此对电力系统短路故障进行仿真模拟,在计算时步中对电磁参数-励磁电流及发电机转速实时更新,通过不平衡磁拉力建立起水机电系统和转子-轴承系统的耦合,从而分析电力系统不同短路故障对转子动力特性的影响。结果表明,电力系统是否保持稳定对发电机组转子-轴承系统有着重要影响,其中三相短路对其稳定性的影响最为显著,只要及时切除故障线路,可以有效避免机组产生剧烈振动。

关键词: 水机电耦联系统;暂态稳定性;短路故障;发电机组转子轴承系统

中图分类号: TK730.3⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)04-0242-07

Influence of Power Systems Fault on the Stability of Rotor-bearing System for Hydroelectric Set

WEN Qian, MA Zhenyue

(School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to explore the dynamic characteristics of vibration of hydroelectric generating units under the coupling conditions of hydraulic, mechanical and electrical systems of hydropower stations. This paper adopts modular modeling method, in which we established multi-precision modular model of hydro-generator subsystems by using software MATLAB/SIMULINK. The coupling system simulates the three-phase of the power system fault. By using the calculation method of real-time updating of electromagnetic parameters-excitation current and generator speed in time step, we develop the connection between the hydraulic-mechanical-electrical coupling system and rotor-bearing system for hydroelectric set by the unbalanced magnetic pull (UMP), to analyze the vibration characteristics of rotor-bearing system for hydroelectric set under the influence of the short-circuit fault of power system. The results show that the stability of power system has an important influence on rotor-bearing system for hydroelectric set, and the worst situation on system stability is three-phase fault in the power systems. Furthermore, timely removal of fault lines can effectively avoid the emergence of severe vibration of the hydro-generating unit.

Keywords: hydraulic-mechanical-electrical coupling system; transient stability; short circuit fault; rotor-bearing system for hydroelectric set

电力系统运行随着电力互联网络规模的增大而愈来愈复杂。造成电力系统无法平稳运行的因素也越来越多。对于电力系统平稳运行状态的概念,指

在同步转速运行时,系统中的发电机以恒定的电压和功率向负荷供电。电力系统的稳定性即为当系统处于某平稳运行状态时,电力系统遭受干扰,系统能

收稿日期:2019-03-20

修稿日期:2019-04-19

基金项目:国家重大研发计划资助项目(2016YFC0401900)

作者简介:温倩(1992—),女,山西阳泉人,硕士研究生,研究方向为水电站水机电耦联系统下机组振动。E-mail:wq61729@163.com

通讯作者:马震岳(1962—),男,河南南阳人,博士,教授,博导,主要从事水轮发电机组动力学和水电站建筑物结构分析方面的研究工作。

E-mail:dmzy@dlut.edu.cn

否返回到先前的平稳状态或过渡到新的平稳运行状态^[1]。如果能够,则认为系统在该运行状态下稳定;反之,则说明系统是不稳定的^[1]。作为电力系统稳定性的一种,暂态稳定性是指当电力系统在某个平稳状态下运行时,遇到较大的干扰,能够通过一段时间的过渡过程而返回到原有的运行状态或达到新的平稳运行状态^[2]。

常见的大干扰主要分为以下几种:(1) 除去或增加发电机、变压器、线路等元件;(2) 负荷突然增加或减少;(3) 发生短路故障。在上述干扰中,短路故障的影响最为严重,故其可以作为检验系统是否稳定的重要条件之一。

随着水电站在电网运行中的投入日益加大,其承担了越来越重的调峰调频任务。水电站水机电整体的动态特性对于电力系统安全稳定运行的影响也不断增大^[3]。与此同时,电网中电压和功率的异常波动也会对发电机组的正常运行产生影响,造成机组的振荡。由于水电站装机容量的不断增大,机组

的重量及其作用在水电站厂房上的力也愈来愈大,机组的振动也会引起厂房结构的振动,对其安全造成影响^[4]。而作为一个由水力系统、机械系统及电磁系统三大子系统组成的非线性动力强耦联系统,水电站水机电耦联系统的动态特性受各子系统综合作用和影响^[5-6]。

目前各子系统在其各自领域研究都已较为成熟,但各个系统的计算方式相差迥异,跨越的知识体系较广。此外随着水电站实际运行过程中不断出现多系统耦合特性,建立一个较为完善的水机电耦合系统模型具有重要意义。

本文以水电站水机电耦联系统为研究对象,通过 MATLAB/SIMULINK 建立起包含水轮机及调速器系统、发电机系统、励磁系统等构成的水机电耦联仿真模型,并利用 MATLAB 语言编程建立起水轮发电机组转子-轴承系统的运动微分方程。水电站水机电耦联系统基本结构如图 1 所示。

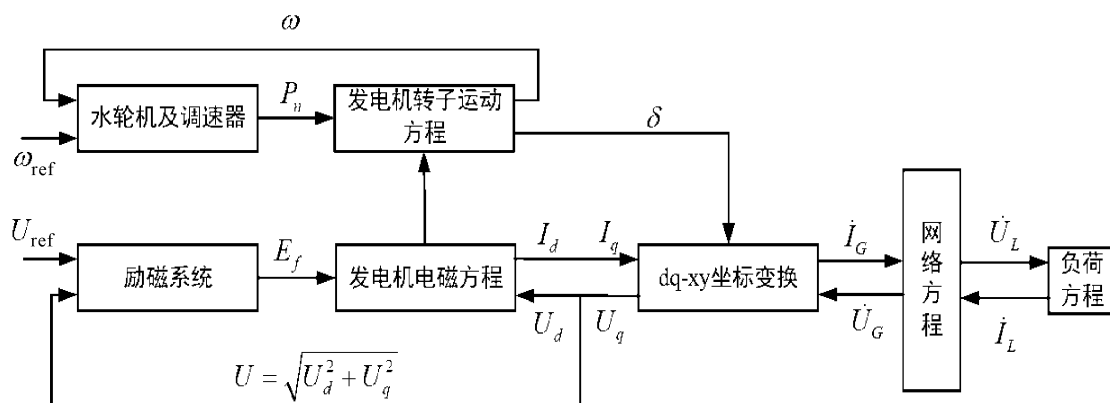


图 1 水电站水机电耦联系统基本结构图

作为一个复杂的大规模时变系统,电力系统发生的负荷剧烈变化、故障都具有较强的随机性,在这些过程中,电能的质量将发生很大的变化。在电力系统遭受较大的干扰时,系统运行中的各种电磁参数将发生剧烈变化,但由于发电机较大惯性力的作用,短时间内发电机功率不会发生突变,因而发电机转子上的机械转矩和电磁转矩无法继续保持平衡,进而导致不平衡转矩的发生。不平衡转矩会改变发电机的转速,又使得同步发电机的转子位置偏心,即发电机电动势之间的相对角度变化,系统中的电流、电压和电磁功率也会随之而变化^[7]。本文针对电力系统受到短路故障干扰时,故障切除时间及故障类型对发电机转子-轴承系统稳定性的影响进行分析。

以往关于水轮发电机组转子-轴承系统振动特性的研究主要关注点在于机组轴系自身参数,如轴承刚度、轴承轴颈间隙、转子质量的偏心等,对正常

运行状态下系统的动力学特性的分析^[8]。而机组转子-轴承系统是一个复杂的耦联非线性系统,其动力学特性仍然受其他因素影响,如电磁参数、转子转速等。本文通过不平衡磁拉力建立水机电耦联系统与转子-轴承结构系统的耦合,并在求解其运动方程中,对励磁电流和转速进行了时步更新,分析电力系统的短路故障对水轮发电机组转子-轴承系统振动特性的影响。

1 模型建立和解析计算

1.1 水机电耦联模型的建立

对水机电耦联系统进行稳定性分析的时候,各子系统仿真模块的选择直接关系到稳定性分析的准确性和精度。因此,合理选择描述各子系统特性的模型不仅能够满足分析结果的精度要求,还可大大简化计算过程。本文根据电力系统的特征,在

MATLAB/Simpower System 工具箱中对应选择合适的仿真模块^[9],设置合适的参数。

1.1.1 MATLAB/SIMULINK 仿真工具

MATLAB^[10]是一款以矩阵运算为基础,通过编程与交互环境的集成,实现工程计算、设计控制、图像处理、信号检测、处理与分析、应用程序开发等功能。其中 SIMULINK 是 1990 年由 Math Works 公司研发设计出的实现动态系统建模和仿真的一个平台。SIMULINK^[11-12]以 MATLAB 强大的计算功能为基础,能够快速地建立模型,利用模块框图进行仿真和计算,解决了 MATLAB 不易解决的非线性、变系数等问题,它能够进行连续系统和离散系统的仿真,也能够进行连续和离散混合系统的动态特性分析,更为直观、方便和灵活。

SIMULINK 4.1 版开始包含电力系统模块库 (Power System Blockset),该库包含了许多典型的设备模型,例如:电机、电源、基本元件、电力电子等,采用变步长积分法,能够较为精确的进行仿真与分析。

1.1.2 单机无穷大模型

在对电力系统暂态稳定性进行定性分析中,通常在理想状态下采用单机无穷大模型。针对单机无穷大系统^[13],做以下假设:(1) 其功率无穷大;(2) 恒定频率、恒定电压。

1.1.3 仿真模型的搭建

利用 MATLAB/SIMULINK 软件中的电力系统模块库 (Power System Blockset),建立如图 2 所示的系统仿真模型^[13]。

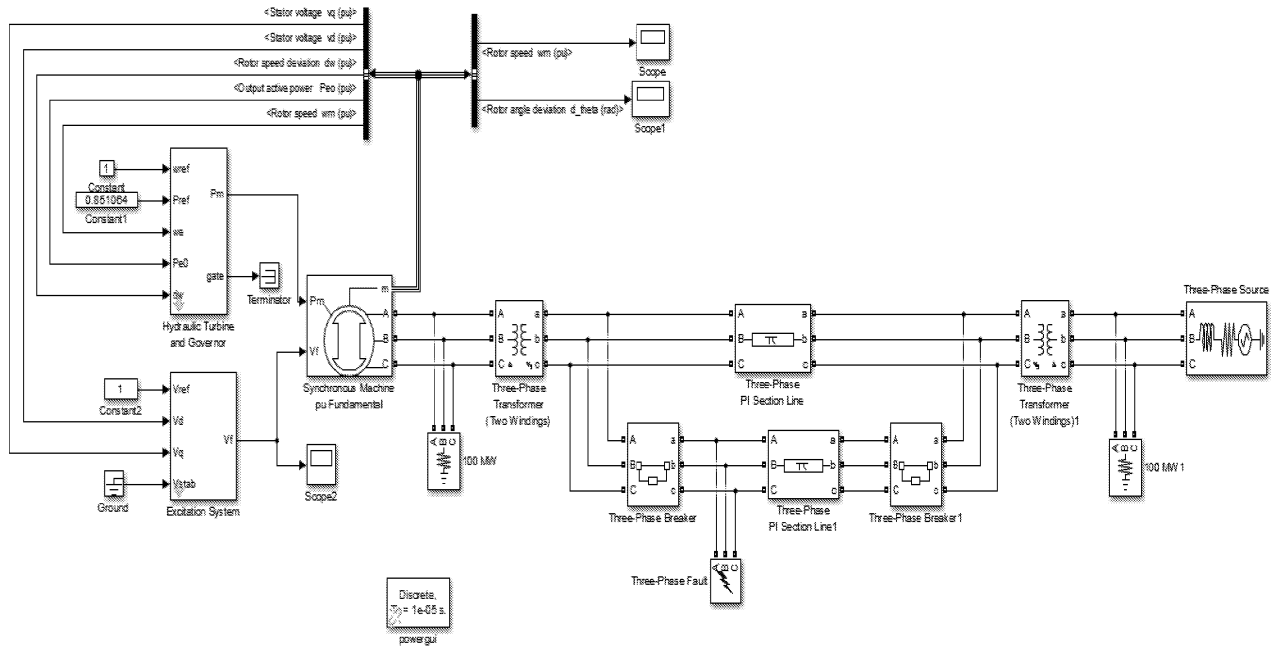


图 2 水机电耦联系统仿真模型

2 水轮发电机组转子-轴承系统的建模

如图 3 所示^[14],定子的圆中心为 O , $O-xyz$ 为三维直角坐标系,当大轴无振动时中心 O 与 S 重合,转子重心为 G , $e_0 = SG$ 为转子质量的偏心距,大轴的旋转偏心距为 $e = OS$ 。

2.1 不平衡磁拉力的计算

综合比较不平衡磁拉力的三种求解方法,其中线性分析方法误差较大,数值分析虽然精度高但计算繁杂,故本文采用非线性解析表达式来描述不平衡磁拉力。表达式如下^[15]:

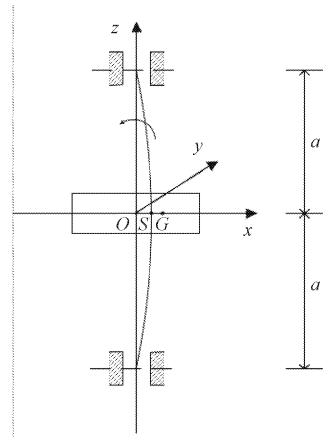


图 3 水轮发电机组转子-轴承模型

$$\begin{bmatrix} F_{x_ump} \\ F_{y_ump} \end{bmatrix} = \frac{R_r L_r \pi k_j^2 I_j^2}{4\mu_0} (2\Lambda_0 \Lambda_1 + \Lambda_1 \Lambda_2 + \Lambda_2 \Lambda_3) \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{其中: } \cos\gamma = \frac{X_1}{e}, \sin\gamma = \frac{Y_1}{e}$$

式中: X_1, Y_1 为转子外圆几何中心的坐标; $e = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}$ 为转子偏心距; γ 为发电机转子方向角; μ_0 为空气磁导系数; L_r, R_r 分别为转子长度和半径; I_j 为发电机转子的励磁电流; k_j 为气隙基波磁动势系数。

$$\Lambda_n = \begin{cases} \frac{\mu_0}{\delta_0} \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}, & n=0 \\ \frac{2\mu_0}{\delta_0} \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \left[\frac{1-\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon} \right]^n, & n>0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon = e/\delta_0$ 为相对偏心; δ_0 为发电机转子不偏心时的平均气隙长度。

2.2 非线性油膜力

本文采用 Capone 模型^[16] 对轴承油膜力进行计算,该模型的精确度和收敛性都能较好地满足工程应用和理论研究。具体表达式如下:

$$f_x = \sigma \bar{f}_x; \quad f_y = \sigma \bar{f}_y \quad (3)$$

其中

$$\sigma = \mu\omega R_b L_b \left(\frac{R_b}{c_z} \right)^2 \left(\frac{L_b}{2R_b} \right)^2$$

$$\left[\frac{\bar{f}_x}{\bar{f}_y} \right] = - \frac{[(x-2y')^2 + (y+2x')^2]^{\frac{1}{2}}}{1-x^2-y^2}$$

$$\left[\begin{array}{l} 3xV(x,y,\alpha) - \sin\alpha G(x,y,\alpha) - 2\cos\alpha S(x,y,\alpha) \\ 3yV(x,y,\alpha) + \cos\alpha G(x,y,\alpha) - 2\sin\alpha S(x,y,\alpha) \end{array} \right]$$

其中

$$V(x,y,\alpha) = \frac{2 + (y\cos\alpha - x\sin\alpha)G(x,y,\alpha)}{1-x^2-y^2}$$

$$S(x,y,\alpha) = \frac{x\cos\alpha + y\sin\alpha}{1 - (x\cos\alpha + y\sin\alpha)^2}$$

$$G(x,y,\alpha) = \frac{2}{(1-x^2-y^2)^{1/2}} \cdot \left[\frac{\pi}{2} + \arctan \frac{y\cos\alpha - x\sin\alpha}{(1-x^2-y^2)^{1/2}} \right]$$

$$\alpha = \arctan \frac{y+2x'}{x-2y'} - \frac{\pi}{2} \operatorname{sgn} \left(\frac{y+2x'}{x-2y'} \right) -$$

$$\frac{\pi}{2} \operatorname{sgn}(y+2x')$$

式中: σ 为 Sommerfeld 校正系数; μ 为润滑剂的黏度; c_z 为轴承轴颈间隙; L_b, R_b 分别为轴承的长度与半径; \bar{f}_x 和 \bar{f}_y 分别为油膜力的无量纲分量。

2.3 系统运动微分方程

假定上导轴承、下导轴承与转子间的距离为 a ,

转轴两侧的刚度均为 K_e 。不考虑转轴的重量以及转子重心回旋体的极惯性矩,由拉格朗日方程可得水轮发电机组转子-轴承系统的运动微分方程:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_1 + c_1 \dot{X}_1 + K_e (X_1 - X_2) = m_1 \omega^2 e_0 \cos\omega t + F_{x_ump} \\ m_1 \ddot{Y}_1 + c_1 \dot{Y}_1 + K_e (Y_1 - Y_2) = m_1 \omega^2 e_0 \sin\omega t + F_{y_ump} \\ m_2 \ddot{X}_2 + c_2 \dot{X}_2 + \frac{K_e}{2} (X_2 - X_1) = f_x \\ m_2 \ddot{Y}_2 + c_2 \dot{Y}_2 + \frac{K_e}{2} (Y_2 - Y_1) = f_y \end{cases} \quad (4)$$

式中: m_1, m_2 分别为转子和轴承的质量; c_1 为转子处阻尼; c_2 为轴承处阻尼。 X_1, Y_1 为转子外圆几何中心位移; X_2, Y_2 为轴承轴颈位移; f_x 为 x 方向上的油膜力分量; f_y 为 y 方向上的油膜力分量,其表达式见式(3)。

为方便计算和讨论,引入无量纲参数,令

$$T = \omega t, x_1 = \frac{X_1}{\delta_0}, y_1 = \frac{Y_1}{\delta_0}, x_2 = \frac{X_2}{c_z}, y_2 = \frac{Y_2}{c_z}$$

则有

$$\frac{d}{dt} = \omega \frac{d}{dT}, \frac{d^2}{dt^2} = \omega^2 \frac{d^2}{dT^2}, x' = \frac{dx}{dT},$$

$$y' = \frac{dy}{dT}, x'' = \frac{d^2x}{dT^2}, y'' = \frac{d^2y}{dT^2}$$

在上述运动微分方程中代入不平衡磁拉力和非线性油膜力,对方程无量纲化处理得到式(5)。

$$\begin{cases} x''_1 + \frac{c_1}{m_1 \omega} x'_1 + \frac{K_e}{m_1 \omega^2} x_1 - \frac{K_e c_z}{m_1 \omega^2 \delta_0} x_2 = \\ \frac{e_0 \cos T}{\delta_0} + \frac{F_{x_ump}}{m_1 \omega^2 \delta_0} \\ y''_1 + \frac{c_1}{m_1 \omega} y'_1 + \frac{K_e}{m_1 \omega^2} y_1 - \frac{K_e c_z}{m_1 \omega^2 \delta_0} y_2 = \\ \frac{e_0 \sin T}{\delta_0} + \frac{F_{y_ump}}{m_1 \omega^2 \delta_0} \\ x''_2 + \frac{c_2}{m_2 \omega} x'_1 - \frac{K_e \delta_0}{2 m_2 \omega^2 c_z} x_1 + \frac{K_e}{2 m_2 \omega^2} x_2 = \frac{f_x}{m_2 \omega^2 c_z} \\ y''_2 + \frac{c_2}{m_2 \omega} y'_1 - \frac{K_e \delta_0}{2 m_2 \omega^2 c_z} y_1 + \frac{K_e}{2 m_2 \omega^2} y_2 = \frac{f_y}{m_2 \omega^2 c_z} \end{cases} \quad (5)$$

3 数值仿真

电力系统运行期间,当相与相或相与地之间出现异常连接时,线路中往往会流过远大于额定值的电流,将严重影响电力系统的运行。三相短路、两相短路、单相对地短路和两相对地短路,是系统短路故

障的 4 种主要类型。

本文假设短路故障发生在系统线路出口,随后同时断开线路两侧开关,以将故障线路切除。本文针对不同的故障类型以及故障切除的时间进行仿真模拟。对于水轮发电机组主轴系统动力学瞬态分析,以往常将不平衡磁拉力以及转子转速设为固定值,而本文在转子-轴承系统动力学分析中,将不平衡磁拉力及转子转速设定为时变参数,利用 MATLAB 自有函数 ODE23t 求解系统的运动微分方程。

3.1 计算参数设定

本文意在对其研究内容进行定性分析,计算参数选自文献[8]的一个计算实例,发电机的参数设定如下: $S_{GN} = 352.2 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $P_{GN} = 300 \text{ MW}$, $U_{GN} = 10.5 \text{ kV}$, $x_d = 1$, $x'_d = 0.25$, $x''_d = 0.25$, $x_q = 0.6$, $x'_a = 0.243$, $x_1 = 0.18$, $T'_d = 1.01$, $T''_d = 0.053$, $T''_{q0} = 0.1$, $R_s = 0.0028$, $H(s) = 4 \text{ s}$, $T_{JN} = 8 \text{ s}$; 负序电抗: $x_2 = 0.2$ 。

变压器 T-1 的参数: $S_{TN1} = 360 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $U_{ST1} \% = 14\%$, $k_{T1} = 10.5/242$; 变压器 T-2 的参数: $S_{TN2} = 360 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $U_{ST2} \% = 14\%$, $k_{T2} = 220/110$ 。

线路的参数: $l = 250 \text{ km}$, $U_N = 220 \text{ kV}$, $x_l = 0.41 \text{ } \Omega/\text{km}$, $r_L = 0.07 \text{ } \Omega/\text{km}$, 线路的零序电抗是正序电抗的 5 倍。

运行条件为: $U_0 = 115 \text{ kV}$, $P_0 = 250 \text{ MW}$ 。

水轮发电机转子-轴承系统参数为: $m_1 = 60 \text{ kg}$, $m_2 = 25 \text{ kg}$, $c_1 = 1\ 200 \text{ N} \cdot \text{S}/\text{m}$, $K_e = 6.2 \times 10^6 \text{ N}/\text{m}$, $R_r = 60 \times 10^{-3} \text{ m}$, $L_r = 150 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\delta_0 = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\mu = 18 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{m}$, $\omega = 13 \text{ rad}/\text{s}$ 。

3.2 计算结果与分析

3.2.1 故障线路切除时间对机组转子-轴承运动特性的影响

当电力系统遭受大的干扰时,系统各部分会在不同时间段做出不同的反应,主要分为三个阶段,起始阶段:故障干扰后约 1 s 内,考虑保护动作,如切除故障线路等;中间阶段:随后 5 s 内,调节系统开始发挥作用;后期:中间阶段过后,电容器和自动切负荷装置运作。本文以单相对地短路故障为例进行研究,设定系统在正常启动运行后 1 s 时出现单相对地短路故障,并分别在故障出现后的 0.1 s、0.3 s 及 0.5 s 时切除故障线路。仿真时间设定为 15 s,转子运动轨迹图取前 5 s 的数据进行绘制。图 4 为故障后分别在 0.1 s、0.3 s 及 0.5 s 切除线路条件下所对应的发电机转速曲线图。图 5 为不同故障线路切除时间所对应的水轮发电机组转子横向 X_1 方向上的时程运动轨迹图。

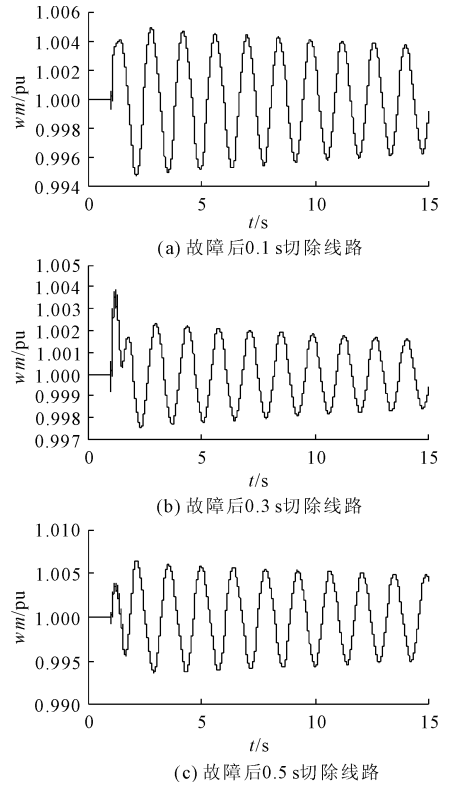


图 4 故障后不同切除时间下发电机转速曲线图

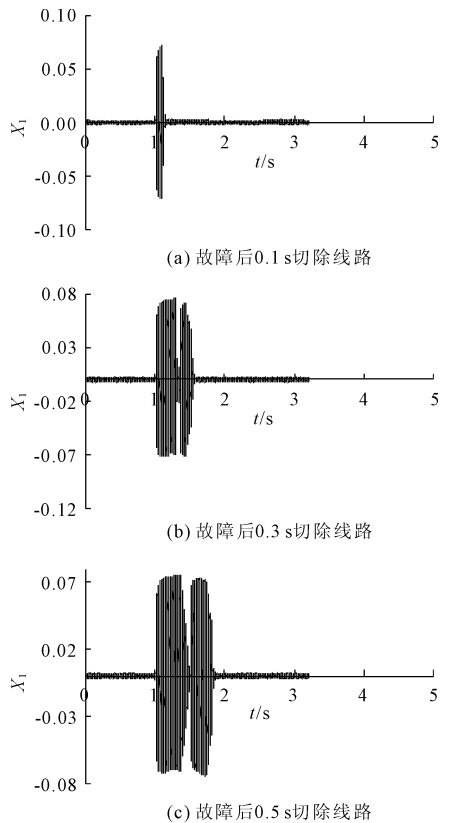


图 5 故障后不同切除时间下发电机转子轴心 X_1 方向轨迹图

从图 4 可以看出,当系统在 1 s 时出现单相对地短路故障时,发电机转子的转速会发生突变,但转速振动的幅度会随时间而不断减小,系统仍处于一

个稳定状态。对应的由图 5 可知,当系统遇到较大干扰的时候,水轮发电机产生较大的振动,但随着故障线路的及时切除,转子-轴承系统经过一段时间的振动后恢复稳定状态。并且切除故障线路的时间越晚,转子-轴承系统的振动持续时间越久。表 1 为故障后不同切除时间所对应的发电机转子轴心横向 X_1 方向振动幅度的最大值。

表 1 故障后不同切除时间所对应的振幅最大值

时间 t/s	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0
振幅最大值/ (10^{-2})	715	748	754	756	756	756	756

由表 1 可知,切除故障时间越晚,发电机组转子-轴承系统振动幅度的最大值越大,但增加到一定值后就不在继续增大。

图 6 和图 7 分别是当故障发生后 0.7 s 时切除故障线路所对应的发电机转速变化曲线图及水轮发电机组转子在 X_1 方向上的运动轨迹图。

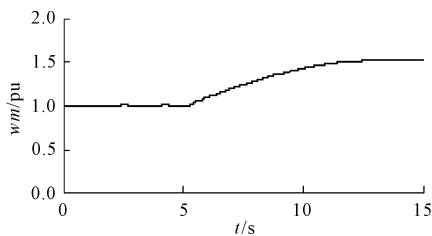


图 6 故障后 0.7 s 切除线路,发电机转速曲线图

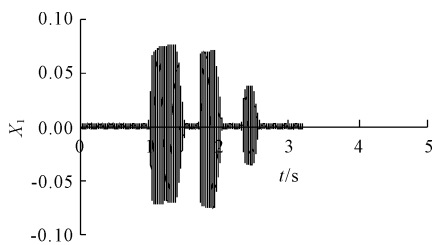


图 7 故障后 0.7 s 切除线路,转子运动轨迹图

图 8 和图 9 分别表示故障发生后 1 s 时切除故障线路所对应的发电机转速变化曲线和发电机组转子运动轨迹图。

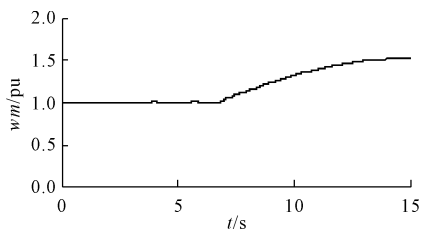


图 8 故障后 1 s 切除线路,发电机转速曲线图

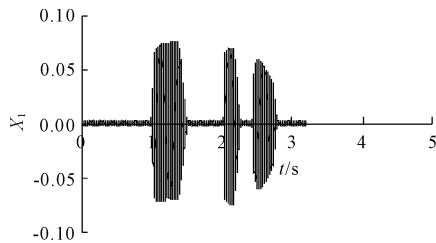


图 9 故障后 1 s 切除线路,转子运动轨迹图

从图 6、图 8 的模拟曲线可以看出,在故障发生 0.7 s 和 1 s 后切除故障线路时,发电机的转速随时间而不断增大,系统处于不稳定状态。而由图 7 及图 9 可知,当系统失稳后,发电机转子-轴承系统会发生剧烈的振荡,且振荡持续的时间要大于系统稳定状态下的时间。失稳状态下切除故障线路的时间长短对水轮发电机转子-轴承系统的振动幅度影响并不明显,只会影响振动的持续时间。

3.2.2 故障类型对机组转子-轴承运动特性的影响

分别对上述四种不同类型的短路故障进行仿真模拟,设定系统在正常启动运行后 1 s 时出现短路故障,仿真时间设置为 15 s。经过一定时长的仿真模拟,得到系统临近失稳的时间点。如图 10—图 13 所示,单相接地短路故障情况下,当故障后约 0.67 s 时,发电机转速变化曲线图中转速的振荡幅度呈逐渐发散状态,故而系统已处于失稳状态。而两相短路、两相接地短路及三相短路条件下,分别对应在故障后约 0.63 s、0.22 s 及 0.20 s 出现上述类似状态,系统逐渐趋于失稳。

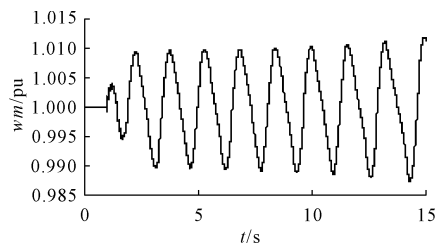


图 10 单相接地短路故障后 0.67 s 切除线路,发电机转速曲线图

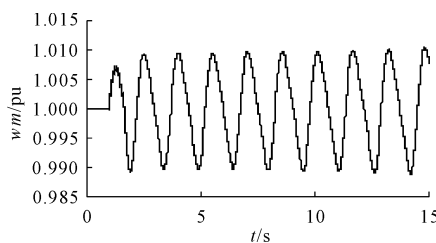


图 11 两相短路故障后 0.63 s 切除线路,发电机转速曲线图

图 14 为不同短路故障类型条件下,在故障出现后的 0.2 s 时切除线路,所对应的水轮发电机组转子-轴承系统轴心运动轨迹图。

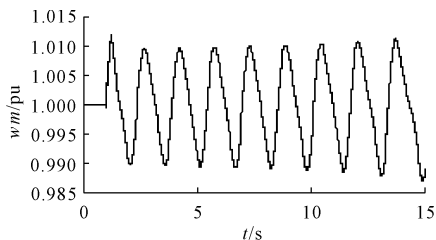


图 12 两相接地短路故障后 0.22 s 切除线路,发电机转速曲线图

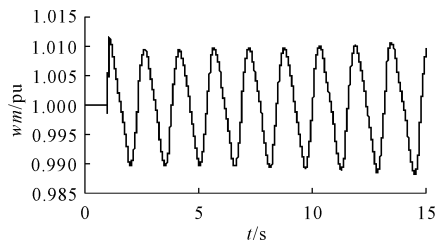
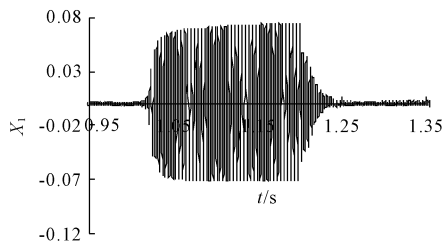
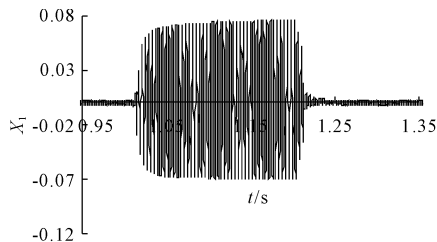


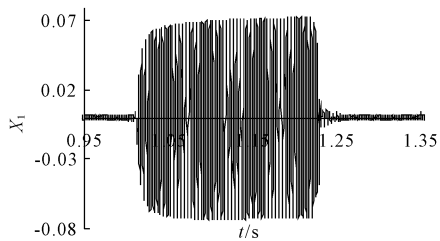
图 13 三相短路故障后 0.20 s 切除线路,发电机转速曲线图



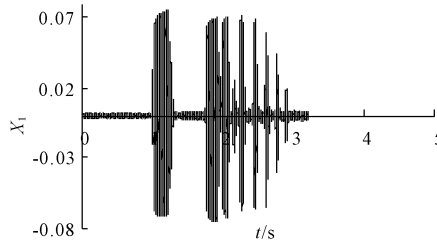
(a) 单相接地短路故障



(b) 两相短路故障



(c) 两相接地短路故障



(d) 三相短路故障

图 14 不同故障类型下水轮发电机组转子轴心 X_1 方向轨迹图

由图 14 可知,不同的故障类型对水轮发电机组振动持续的时间不同,并且同样是 0.20 s 后切除故障线路,单相对地短路、两相短路及两相对地短路故障下,系统仍处于稳定状态,水轮发电机组转子的剧烈振动时间约在 0.25 s 之内,而对于三相短路故障,系统已不再稳定,机组转子出现剧烈振动。单相对地短路、两相短路、两相对地短路及三相短路故障所对应的转子振幅的最大值分别为:0.074 8、0.075 6、0.073 7、0.075 7。由此可知不同的短路故障类型对转子振动幅度的影响也不同,其中三相短路故障的影响最大。

4 结 语

电力系统的稳定性对水轮发电机组振动有着重要影响,当电力系统受到短路故障干扰时,如果能及时切除故障线路,系统仍保持稳定,即经过一段时间后,系统可以恢复到或重新过渡到一个电压、频率等保持稳定的运行状态,那么水轮发电机组转子-轴承系统的振动能够较为迅速地恢复到平稳状态。当故障切除时间较晚,电力系统处于失稳状态时,水轮发电机组会随之产生剧烈振动,剧烈振动持续的时

间远大于系统处于稳定状态时的时间。因此快速及时地切除故障线路能够有效避免水轮发电机组持续剧烈振动。短路故障发生后,水轮发电机组转子-轴承系统的振动持续时间以及振幅会随故障切除时间的增大而增大。不同类型的短路故障会对水轮发电机组转子-轴承系统的振动产生不同的影响,其中三相短路故障的影响最为严重。

参考文献:

- [1] 张 炜. 电力系统分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [2] 李光琦. 电力系统分析[M]. 3 版. 北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 韩志勇,徐衍会,辛建波,等. 水轮机组与电网耦合对电网动态稳定的影响[J]. 电工技术学报,2009,24(9):166-170.
- [4] 卫洋波,陈 婧,马震岳. 抽水蓄能电站地下主副厂房振动传递途径研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(4):101-106.
- [5] 束洪春,张加贝. 水机电耦合系统建模及暂态分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(13):26-30.

较,可以看出惠州市基于人口的用水量分配是绝对公平的,其次是粮食播种面积、水资源总量和 GDP 三个指标的用水量分配是相对平均的。因此,总体上惠州市不同区域的用水量分配较公平。

4 结论与建议

(1) 利用经济学中的基尼系数对惠州市不同区域的用水公平性进行评价。结果表明,基尼系数可以较好地反映区域用水的公平性,对区域的水资源合理配置具有理论和实际意义。

(2) 惠州市各单项指标与用水量的基尼系数均在警戒线 0.4 以下,表明惠州市区域用水量分配较公平,这与惠州市近年来实施最严格的水资源管理制度密不可分,但可以看出 GDP - 用水量基尼系数较其他指标与用水量的基尼系数大,说明不同区域工业企业节水水平还是有差异,节水水平落后的地区还需加大力度提高用水效率。

参考文献:

[1] 王志鹏,刘群昌,戴 玮,等. 基于水约束的种植结构优化方法综述[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):231-235.

[2] Peter Rogers, Radhikade Silva, Ramesh Bhatia. Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability [J]. Water Policy, 2002(4):1-17.

[3] 甘 泓,王 浩,罗尧增,等. 水定价方法对农业用水效率及公平性的影响分析[J]. 水利科技与经济,2005,11(5):257-261.

[4] 刘德地,陈晓宏. 一种区域用水量公平性的评估方法[J]. 水科学进展,2008,19(2):268-272.

[5] 罗 铭,刚 傲. 基于最大可支撑人口水资源承载力评价分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(5):224-228.

[6] 马海良,王若梅,訾永成. 中国省际水资源利用的公平性研究[J]. 中国人口资源与环境,2015,25(12):70-77.

[7] 王小军,张建云,刘九夫,等. 我国用水公平性问题研究[J]. 自然资源学报,2011,26(2):328-334.

[8] 张志果,邵益生. 我国城镇居民用水公平性分析[J]. 给水排水,2013,39(7):131-133.

[9] 董 路,孙才志,邹 玮,等. 水足迹视角下中国用水公平性评价及时空演变分析[J]. 资源科学,2014,36(9):1779-1809.

[10] 章恒全,杨雅婷,张陈俊. 基于基尼系数的湖北省用水公平性研究[J]. 水利经济,2019,37(1):1-6,25,79.

[11] 马艳红,牛 娟,刘海龙. 基于多角度的山西省水资源基尼系数分析[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),2019,33(2):100-105.

[12] 李建芳,粟晓玲. 基于基尼系数的内陆河流域用水公平性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(8):217-222.

[13] 王金南,逯元堂,周劲松,等. 基于 GDP 的中国资源环境基尼系数分析[J]. 中国环境科学,2006,26(1):111-115.

[14] 徐万坪. 基尼系数的算法[J]. 统计与决策,2004(9):121-1221.

[15] 惠州市水务局,广东省水文局惠州分局. 惠州市水资源公报[EB/OL]. <http://bsdt.huizhou.gov.cn/>. 2013 - 2017.

[16] 惠州市统计局,国家统计局惠州调查队. 惠州统计年鉴:2013—2017[M]. 北京:中国统计出版社,2017.

(上接第 248 页)

[6] 郑秀梅,马震岳. 水电站地下厂房机墩结构动力特性分析中几点问题探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(3):26-30.

[7] 汪芳宗,陈德树,何仰赞. 大规模电力系统暂态稳定性实时仿真及快速判断[J]. 中国发电机工程学报,1993(6):13-19.

[8] 张雷克,马震岳,宋兵伟. 水轮发电机组在不平衡磁力及密封力下振动特性分析[J]. 水电能源科学,2010,28(9):117-120.

[9] 于 群,曹 娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2017.

[10] 薛定宇. 科学运算语言 MATLAB5.3 程序设计与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[11] 薛定宇,陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[12] 吴明天,谢小竹,彭 彬. MATLAB 电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

[13] 王 晶,翁国庆,张有兵. 电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.

[14] 马震岳,董毓新. 水轮发电机组动力学[M]. 大连:大连理工大学出版社,2003.

[15] Guo D, Chun F, Chen D. The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002,254(2):297-312.

[16] Adiletta G, Guido A R, Rossi C. Chaotic motions of a rigid rotor in short journal bearings[J]. Nonlinear Dynamics, 1996,10(3):251-269.