

一种抑制超低频振荡的水电机组 调速器参数协调优化方法研究

王渝红¹, 陈阳¹, 曾琦¹, 王媛¹, 李建², 王彪², 韩连山³

(1. 四川大学电气信息学院, 四川成都 610065;

2. 国网四川省电力公司, 四川成都 610041; 3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102)

摘要: 基于最小二乘法实现了在线拟合发电机机械转矩阻尼系数, 可准确评估机组对超低频振荡的贡献度。同时提出一种抑制超低频振荡方法, 该方法首先对系统状态子空间进行辨识, 并结合改进粒子群算法协调优化机组调速器 PI 参数, 实现了对超低频振荡的抑制。最后, 利用 PSASP 软件在改进的 EPRI 36 节点模型进行了仿真验证, 结果表明所提方法能有效抑制超低频振荡。

关键词: 超低频振荡; 阻尼转矩系数; 子空间模型辨识; 调速器参数协调优化

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)02-0010-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.02.003

Research on Governor Parameter Coordinated Optimization to Suppress ULFO for Hydraulic Turbine

Wang Yuhong¹, Chen Yang¹, Zeng Qi¹, Wang Yuan¹, Li Jian², Wang Biao², Han Lianshan³

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Nari-relays Engineering Technique Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: An effective method to evaluate contribution degree of ultra-low-frequency oscillation (ULFO) for hydraulic turbine based on the least square fitting method is realized. And a suppression scheme for ULFO is presented. The state subspace representation is identified and governor parameters of hydraulic turbine are optimized by an improved particle swarm optimization. Finally, the effectiveness of the proposed suppression scheme for ULFO are verified with an improved EPRI 36-nodes system.

Key words: ultra-low-frequency oscillation; damping torque coefficient; subspace model identification; governor parameter coordinated optimization

0 引言

近年来在水电机组占比较高的直流送出系统中出现了振荡频率低于 0.1 Hz 的超低频率振荡现象, 其振荡频率显著低于低频振荡范围^[1-2]。2016 年 3 月, 南方电网在进行云南异步联网试验时, 出现持续时间 25 min, 周期为 20 s 的超低频率振荡^[3-6]。同时研究发现当渝鄂背靠背柔性直流工程投入运行后, 川渝电网也与主网实现异步联网, 与云南电网情

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGTYYHT/15-JS-191)

况类似, 川渝电网也存在发生超低频振荡的风险。

文献[7]指出超低频振荡发生后, 系统中所有发电机转速同调变化, 系统频率整体振荡, 可将多机系统等值为单机带负荷系统进行分析。文献[8-10]针对水电外送孤岛系统进行小干扰分析, 指出水轮机调速器 PI 控制器的积分系数 K_P 、比例系数 K_I 、水锤效应时间常数 T_w 是影响超低频振荡的关键因素。文献[11-12]针对云南异步联网验证性试验过程中出现的超低频振荡现象, 重新整定了云南水电机组的调速器参数, 即将所有水电机组调速器 K_P 减小为原来的二分之一, K_I 减小为原来的十分之一;

但该方法没有对引发超低频振荡的振荡源进行定位,需要重新整定参数的水电机组范围过大,同时整定后调速器采用较小的 PI 参数将使得机组响应速度变慢,调节性能变差。文献 [13-16] 分析了传统直流附加频率控制器,通过其快速调节直流输送功率增强送端系统抑制频率振荡的能力;但增设直流附加频率控制器后,将导致直流输送功率随系统频率变化频繁变化,对直流系统的运行及直流受端交流系统稳定性均会造成影响。文献 [17-19] 采用 PSS 作用于发电机励磁系统,利用相位补偿原理产生纯阻尼力矩,起到抑制频率振荡的作用;但 PSS 主要用来抑制低频振荡,对超低频振荡没有抑制效果。文献 [20] 提出一种基于能量流在线评估发电机阻尼特性的方法,但能量流法没有考虑发电机电能和势能的变化,对发电机阻尼特性的评估不够准确。文献 [21] 为定位低频振荡源研究了发电机电磁转矩阻尼系数的辨识方法,但该方法对超低频振荡源机组的定位不够准确。

在出现超低频振荡的电网中,存在水电机组多、机组容量分散的特点。采用逐一调整水电机组调速器 PI 参数抑制超低频振荡的方法工作量大,并将影响电网的调频性能。因此有必要将水电机组对超低频振荡的贡献度进行评估,通过对贡献度大的水电机组调速器 PI 参数优化,抑制超低频振荡。

下面提出一种超低频振荡抑制方法。该方法基于子空间辨识算法和改进粒子群算法实现了对超低频振荡贡献度大的机组调速器 PI 参数的协调优化,相较于文献 [11-12] 缩小了待整定调速器 PI 参数的机组范围,减小了对机组调节性能的影响。仿真结果表明采用所提方法可有效抑制超低频振荡。

1 四川电网超低频振荡机理分析

渝鄂背靠背柔性直流工程投运后,西南电网与西北、华中、华东 3 个区域电网异步互联,四川电网稳定特性由多机系统下的暂态功角稳定问题转化为单机带负荷下的频率稳定问题。同时由于四川电网内水电机组装机容量高,水锤效应明显,使得四川电网存在发生超低频振荡的风险。

仿真结果表明,当超低频振荡发生时,四川电网内所有发电机组发生同步振荡,可将网内机组等值为单机系统。建立异步联网后的四川电网超低频振

荡简化分析模型如图 1 所示。

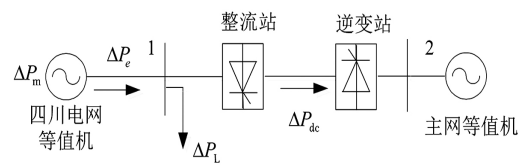


图 1 单机系统模型

图 1 中:左侧机组为超低频振荡下四川电网发电机等值模型,经直流输电系统与主网异步互联; ΔP_m 为发电机机械功率变化量; ΔP_e 为发电机电磁功率变化量; ΔP_L 为本地负荷功率变化量; ΔP_{dc} 为直流输送功率变化量。列写图 1 中四川电网等值机转子运动方程为

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta T_m - \Delta T_e - D\Delta\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_J 为惯性时间常数; ΔT_m 表示发电机机械转矩; ΔT_e 为发电机电磁转矩。电磁转矩和机械转矩均可以写成阻尼转矩分量和同步转矩分量矢量和的形式。

$$\begin{cases} \Delta T_m = \Delta T_{Dm} + \Delta T_{Sm} \\ \Delta T_e = \Delta T_{De} + \Delta T_{Se} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ΔT_{Dm} 为机械转矩阻尼分量; ΔT_{Sm} 为机械转矩同步分量; ΔT_{De} 为电磁转矩阻尼分量; ΔT_{Se} 为电磁转矩同步分量。将式(2)代入式(1)可得

$$T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta T_{Sm} - \Delta T_{Se} - (-\Delta T_{Dm} + \Delta T_{De} + D\Delta\omega) \quad (3)$$

由式(3)可得发电机阻尼转矩 ΔT_D 为

$$\Delta T_D = (-\Delta T_{Dm} + \Delta T_{De} + D\Delta\omega) \quad (4)$$

当 ΔT_D 为负时,将导致超低频振荡发生。发电机阻尼系数 $D > 0$,始终提供正阻尼。当忽略网损时,电磁转矩可认为由本地负荷和直流共同提供,始终为系统提供正阻尼转矩。发电机机械转矩由调速器提供,当机械转矩阻尼分量为负时,将导致发电机阻尼转矩 ΔT_D 为负,引发超低频振荡。

2 机组超低频振荡贡献度评估

当发生超低频振荡时,四川电网第 i 台发电机的机械转矩为

$$\Delta T_{mi} = K_{Di}(-\Delta\omega) + K_{Si}\Delta\delta \quad (5)$$

当 $K_{Di} > 0$ 时,发电机机械转矩为系统提供正阻

尼机组对超低频振荡的贡献度小;当 $K_{Di} < 0$ 时,发电机机械转矩为系统提供负阻尼,机组对超低频振荡的贡献度大。

考虑多机系统下,对第 i 台发电机机械转矩阻尼系数在线拟合,首选对式(5)进行离散化处理得到

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{mi}(T) \\ \Delta T_{mi}(2T) \\ \dots \\ \Delta T_{mi}(NT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega(T) & \Delta\delta(T) \\ \Delta\omega(2T) & \Delta\delta(2T) \\ \dots & \dots \\ \Delta\omega(NT) & \Delta\delta(NT) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Di} \\ K_{Si} \end{bmatrix} + \varepsilon \quad (6)$$

式中: N 为采样点个数; T 为采样周期; ε 为线性估值的误差。发电机调速器机械转矩阻尼系数的在线辨识可以转化为线性估值问题。

$$\begin{aligned} \Delta T_{mi} &= [\Delta\omega \ \Delta\delta] K_i + \varepsilon \\ &= AK_i + \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

定义代价函数 $H(x)$:

$$H(x) = [\Delta T_{mi} - AK_i]^T \cdot [\Delta T_{mi} - AK_i] \quad (8)$$

当 $H(x)$ 达到最小值时, K_i 的估计值为

$$K_i = [A^T \cdot A]^{-1} \cdot A^T \cdot \Delta T_{mi} \quad (9)$$

当 $A^T A$ 可逆存在时,由式(9)即可求得发电机机械转矩阻尼系数 K_{Di} 。对四川电网机组超低频振荡贡献度评估的具体步骤如下:

- 1) 获取扰动后时段 t 内各机组机械功率、角速度、功角的离散时序数据;
- 2) 计算各机组时段 t 每个周期 T 内的机械功率、角速度、功角的变化量;
- 3) 将各机组的机械功率、角速度、功角的变化量数据带入式(9),得到各台发电机机械转矩阻尼系数 K_{Di} ;
- 4) 根据第 i 台发电机机械转矩阻尼系数 K_{Di} 的拟合值,评估该机组对超低频振荡的贡献度。

3 系统状态子空间辨识

考虑多输入多输出的高阶电力系统,其状态空间模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u(t)$ 、 $y(t)$ 、 $x(t)$ 分别为系统的输入、输出、可观测状态量; A 是系统矩阵; B 是输入矩阵; C 是输出矩阵; D 是输入直接作用于输出的矩阵。假定输

入输出数据分别为 $u_k, y_k (k = 1, 2, 3, \dots, N)$, 引入分块 Hankel 矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & \dots & u_{n-\alpha+1} \\ u_2 & u_3 & u_4 & \dots & u_{n-\alpha+2} \\ u_3 & u_4 & u_5 & \dots & u_{n-\alpha+3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_\alpha & u_{\alpha+1} & u_{\alpha+2} & \dots & u_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_{n-\alpha+1} \\ y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{n-\alpha+2} \\ y_3 & y_4 & y_5 & \dots & y_{n-\alpha+3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_\alpha & y_{\alpha+1} & y_{\alpha+2} & \dots & y_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 α 为自定分块行数,为保证低秩性 α 必须大于系统的阶次 n 。从状态方程可推导出如下矩阵方程:

$$Y = \Gamma_\alpha X + H_\alpha U + N \quad (13)$$

$$H = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB & D & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & D & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CA^{\alpha-2}B & CA^{\alpha-3}B & CA^{\alpha-4}B & \dots & D \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\Gamma_\alpha = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{\alpha-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

H, Γ_α 分别表示广义可观测矩阵和下三角 Toeplitz 矩阵。当已知 Γ_α 和 X 时可得到系统状态空间矩阵 A, B, C, D 。因此在已知系统输入 u_k 和输出 y_k 时,辨识系统状态空间模型的方法如下: 1) 根据输入输出建立 Hankel 矩阵,并进行 QR 分解得到 Hankel 矩阵的行空间投影; 2) 对该投影进行奇异值分解,得到可观测矩阵 Γ_α 和状态矩阵 X ; 3) 由可观测矩阵 Γ_α 和状态矩阵 X 确定系统状态空间矩阵 A, B, C, D 。

4 超低频振荡水电机组调速器参数整定方法

超低频振荡水电机组调速器参数协调优化方法如图 2 所示,具体步骤如下:

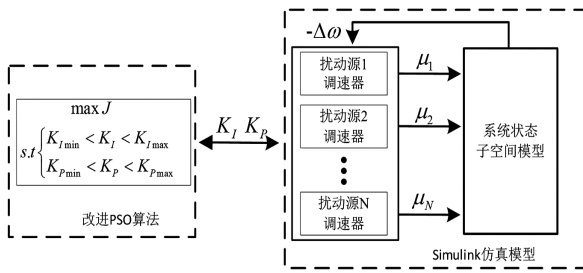


图2 水电机组调速器参数协调优化

- 1) 在线拟合发电机机械转矩阻尼系数, 筛选出阻尼系数为负, 即对超低频振荡贡献度大的机组, 得到待优化机组群;
- 2) 利用状态子空间辨识算法, 辨识待优化机组群的机组开 $\Delta\mu$ 到频率 $-\Delta\omega$ 的系统状态子空间模型;
- 3) 在 Simulink 中建立含待优化机组群调速器和系统状态子空间模型的仿真模型, 结合改进粒子群算法优化机组群调速器 PI 参数。

5 仿真分析

针对 PSASP 软件 EPRI 36 节点标准仿真模型进行改进, 删除 BUS30 - BUS31 交流线, 将 BUS34 - BUS33 交流线替换为直流输电系统。改进后的模型含 AREA1、AREA2 两区域, 分别代表渝鄂柔性直流投运后的四川电网和主网。

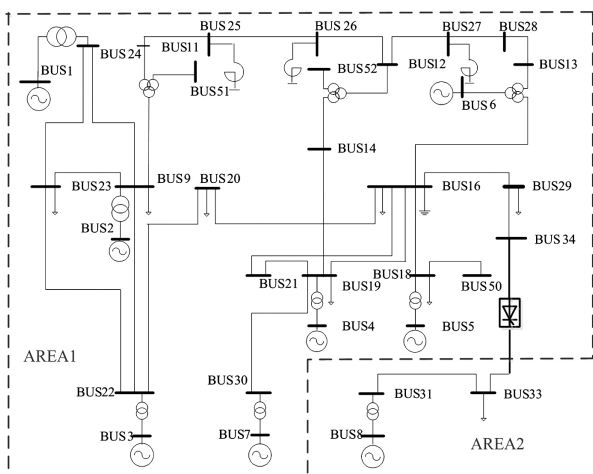


图3 EPRI 36 节点系统

基于改进的 EPRI 36 节点仿真模型, 验证所提水电机组调速器 PI 参数优化方法的有效性。其中 AREA1 含 7 台发电机 (G1 至 G7), 采用 PSASP 软件中 8 型调速器模型, 参数套用四川电网典型水电机组调速器参数。

5.1 负荷扰动

模拟负荷扰动, 在 1 s 时刻, 损失 100 MW 负荷, 系统频率曲线如图 4 所示。

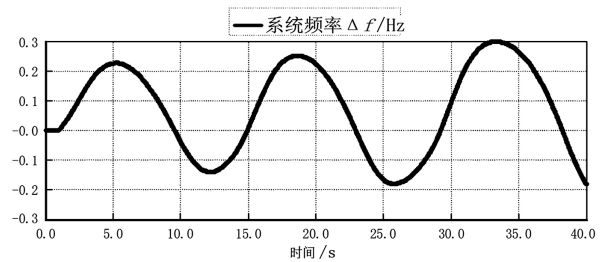


图4 负荷扰动频率曲线

负荷扰动后, 频率出现超低频振荡现象, 振荡频率为 0.056 Hz, 阻尼比为 -0.12 , 频率振荡逐渐发散。为抑制振荡, 需先对超低频振荡贡献度较大的机组进行筛选, 得到待优化机组群; 并以待优化机组群开度作为输入、系统频率作为输出辨识系统状态子空间模型, 利用改进粒子群算法协调优化超低频振荡贡献度较大的机组调速器 PI 参数。

1) 机组超低频振荡贡献度评估

超低频振荡发生后, 拟合 G1 至 G7 发电机机械转矩阻尼系数, 如表 1 所示。

表1 G1 - G7 阻尼系数

发电机	阻尼系数	发电机	阻尼系数
G1	0.140 9	G5	0.059 2
G2	0.070 1	G6	0.005 0
G3	-0.419 5	G7	0.029 1
G4	-0.111 9		

由表 1 可知: G3、G4 发电机机械转矩阻尼系数小于 0, 向系统提供负阻尼转矩, 对超低频振荡的贡献度大; 其余发电机机械转矩阻尼系数均大于 0, 向系统提供正阻尼转矩, 对超低频振荡的贡献度小。为抑制超低频振荡, 需协调优化 G3、G4 发电机调速器 PI 参数。

2) 机组调速器 PI 参数协调优化

模拟 G3、G4 发电机开度阶跃扰动, 辨识系统状态子空间模型。在 1 s 时刻, 在 G3、G4 发电机调速器出口处施加 5% 阶跃扰动作为输入信号, 选取系统频率变化量作为输出信号。辨识得到系统状态子空间模型矩阵 A 、 B 、 C 、 D 如下:

$$A = \begin{bmatrix} -0.034 2 & 0.316 5 \\ -0.316 5 & 0.034 2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.214 5 \\ 25.684 5 \end{bmatrix}$$

$$C = [-0.577 5 \quad 0.001 8] \quad D = [0]$$

其中 A 矩阵特征向量为 $-0.034 2 \pm 0.316 5i$, 辨识得到的系统模型自然振荡频率为 0.05 Hz, 与超低

频振荡频率近似相同,验证了系统状态子空间模型的准确性。

结合 G3、G4 发电机调速器模型和系统状态子空间模型在 Simulink 中搭建闭环仿真系统,并利用改进粒子群算法协调优化调速器 PI 参数。设置惯性权重 w_{min} 、 w_{max} 、 γ 粒子群规模取 50,迭代次数为 30 次。优化前后 G3、G4 发电机调速器 PI 参数见表 2。

表 2 机组调速器参数

	发电机	KP	KI
原参数	G3	14	9
	G4	14	9
优化后参数	G3	5.8	1.1
	G4	6.2	0.9

G3、G4 发电机调速器采用优化后的 PI 参数,其他条件不变,模拟相同负荷阶跃扰动,系统频率曲线如图 5 所示。

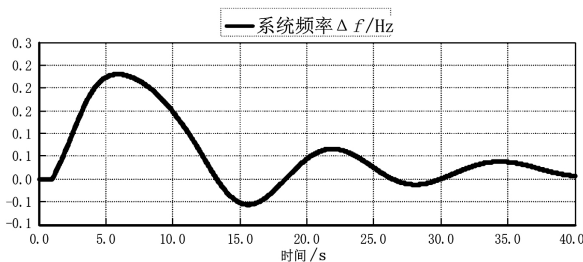


图 5 参数优化后负荷扰动频率曲线

当 G3、G4 发电机调速器采用优化后的 PI 参数,相同负荷扰动下系统频率振荡模式几乎不变,阻尼比从 -0.12 提高到 0.13,超低频振荡得到了有效抑制,系统小干扰稳定性提升。

5.2 接地短路故障

仿真 EPRI 36 节点系统 BUS20 至 BUS22 交流线 1 s 时刻发生三相接地短路故障,1.1 s 时刻切除故障线路。

G3、G4 发电机调速器分别采用原 PI 参数和优化后 PI 参数的系统频率曲线如图 6 所示。从中可以看出,三相接地短路故障时,G3、G4 发电机调速器采用原 PI 参数时,发生超低频振荡;采用优化后 PI 参数,超低频振荡得到有效抑制。

由表 3 可知,G3、G4 发电机调速器采用优化后的 PI 参数可有效提升系统阻尼比,同时说明所提出的水电机组调速器 PI 参数协调优化方法针对不同扰动类型引发的超低频振荡均能够抑制,具有较强的鲁棒性。

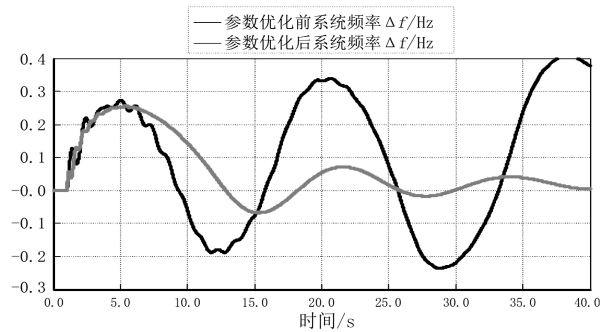


图 6 三相接地短路故障时系统频率曲线

表 3 主振模式

	振荡频率/Hz	阻尼比
原 PI 参数	0.052	-0.10
优化后 PI 参数	0.080	0.14

6 结 语

前面分析了四川电网超低频振荡产生机理,并基于最小二乘法实现了在线拟合发电机机械转矩阻尼系数。当拟合得到的发电机机械转矩阻尼系数为负时,该机组对超低频振荡的贡献度大,可认为是引发超低频振荡的振荡源。为抑制超低频振荡,提出一种水电机组调速 PI 参数协调优化方法,并将状态子空间辨识算法和改进粒子群算法用于参数优化设计。采用所提方法可准确评估机组对超低频振荡的贡献度,有效抑制超低频振荡。

参考文献

- [1] KUNDUR P. Power System Stability and Control [M]. New York, USA: McGraw-Hill Professional, 2005: 130.
- [2] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78-83.
- [3] 刘春晓, 张俊峰, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的机理分析与仿真算法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 29-34.
- [4] 杜斌, 张丹, 张军民, 等. 异步联网后云南电网的稳定特性与控制措施[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 13-16.
- [5] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.
- [6] 付超, 柳勇军, 涂亮, 等. 云南电网与南方电网主网异步联网系统试验分析[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 1-5.

(下转第 29 页)

故障选相判别方法因相间电磁耦合作用造成选相错误的问题。

参考文献

[1] Chamia M, Liberman S. Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines – Development, Design and Application [J]. IEEE Transactions on PAS, 1978, 97(6): 1–6.

[2] 贺家李, 葛耀中. 高压输电线路故障分析与继电保护[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[3] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(4): 23–27.

[4] 董新洲, 耿中行, 葛耀中, 等. 小波变换应用于电力系统故障信号分析初探 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 62–65.

[5] 王渝红, 黄莹莹, 任震, 等. 离散二进小波变换及其在电机故障分析中的应用 [J]. 电力系统自动化, 1995, 19(12): 20–24.

[6] 董新洲, 贺家李, 葛耀中, 等. 基于小波变换的行波故

障选相研究: 第 1 部分 理论基础 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 24–26.

[7] 董新洲, 贺家李, 葛耀中, 等. 基于小波变换的行波故障选相研究: 第 2 部分 仿真试验结果 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 20–22.

[8] 高志勇, 成建军, 张昕. 基于小波变换的变压器差动保护算法 [J]. 四川电力技术, 2011, 34(4): 72–74.

[9] 马爱平, 刘磊. 基于小波理论的输电线路故障信号检测的研究 [J]. 四川电力技术, 2010, 33(5): 16–18.

[10] 喻敏, 王斌, 王文波, 等. 基于同步挤压小波变换的电力系统时变谐波检测 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1): 50–57.

[11] 李国庆, 王丹, 姜涛, 等. 基于递归连续小波变换的电力系统振荡模式辨识 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 8–16.

作者简介:

李 晨(1983), 学士、助理工程师, 从事配电运维及继电保护工作;

张 阔(1986), 硕士、工程师, 从事配电运维及继电保护工作。

(收稿日期: 2018–12–03)

(上接第 14 页)

[7] 路晓敏, 陈磊, 陈亦平, 等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64–70.

[8] 王官宏, 于钊, 张怡, 等. 电力系统超低频率振荡模式排查及分析 [J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2324–2330.

[9] 王官宏, 陶向宇, 李文锋, 等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 80–86.

[10] 王官宏, 黄兴. 汽轮机调速系统参数对电力系统阻尼特性的影响 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 87–90.

[11] 张建新, 刘春晓, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验 [J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 35–39.

[12] 廖梦君, 郭琦, 李鹏, 等. 基于 RTDS 的云南电网与南方电网主网异步联网运行控制特性分析 [J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 40–44.

[13] 李建, 王彪, 刘程卓, 等. 基于直流频率限制控制器的超低频振荡抑制方案 [J]. 高电压技术, 2018, 1–8.

[14] 汤华, 王渝红, 魏亮, 等. HVDC 孤岛运行附加频率鲁棒控制器设计 [J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1066–1072.

[15] 陈亦平, 程哲, 张昆, 等. 高压直流输电系统孤岛运行调频策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 96–102.

[16] 梅勇, 周剑, 吕耀棠, 等. 直流频率限制控制 (FLC) 功

能在云南异步联网中的应用 [J]. 中国电力, 2017, 50(10): 64–70.

[17] 王曦, 李兴源, 赵睿. 基于相对增益和改进粒子群算法的 PSS 与直流调制协调策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6177–6184.

[18] 左剑, 张程稳, 肖逸, 等. 基于灰狼优化算法的多机电力系统稳定器参数最优设计 [J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2987–2955.

[19] 杜文娟, 王海风, 曹军. 稳定器设计的就地相位补偿法在多机电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2012, 32(22): 73–78.

[20] 陈磊, 路晓敏, 陈亦平, 等. 利用暂态能量流的超低频振荡在线分析与紧急控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 9–14.

[21] 李阳海, 黄莹, 刘巨, 等. 基于阻尼转矩分析的电力系统低频振荡源定位 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 84–91.

作者简介:

王渝红(1971), 博士、教授、博士生导师, 从事高压直流输电、电力系统的稳定与分析、新能源并网研究;

陈 阳(1992), 硕士研究生, 从事高压直流输电、电力系统稳定与控制研究;

曾 琦(1977), 博士、讲师, 从事高压直流输电、柔性直流输电、电力系统稳定与控制研究。

(收稿日期: 2018–10–19)