

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802221

# 基于 AGC 的高压互联网络频率协调控制<sup>\*</sup>

刘志坚 陈潇雅

(昆明理工大学 昆明 650500)

**摘要:** 针对高压互联网络频率协调困难,而自动发电控制存在控制跟踪性能差、参数最优值获取难、优化效果不明显等问题,提出了一种基于模拟退火粒子群寻优算法的闭环反馈自动发电控制。改进后的寻优算法结合了模拟退火和粒子群算法的优点,通过该算法对控制器关键参数进行寻优以使区域控制偏差值最小。由 MATLAB/Simulink 仿真分析验证了四机两区域模型联络线发生故障时,改进参数的闭环反馈 AGC 控制器能较快地使系统恢复稳定,且能较好地达到频率协调的控制作用。

**关键词:** 自动发电控制;区域控制偏差;模拟退火粒子群寻优算法;参数优化;闭环反馈

**中图分类号:** TN751.3    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Frequency coordination control of the high-voltage interconnection grid based on AGC

Liu Zhijian Chen Xiaoya

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Due to the difficulty of the frequency coordination in high voltage interconnection network and the problems of poor tracking performance, difficult parameter optimization and poor optimization effect, a closed-loop feedback automatic generation control based on simulated annealing and particle swarm optimization algorithm is proposed. The improved optimization algorithm combines the advantages of simulated annealing and particle swarm optimization, and optimizes the key parameters of the controller to minimize the value of area control error, so that the system can recover stably quickly. The simulation results of MATLAB/Simulink verify that the closed loop feedback AGC controller with improved parameters can restore the stability of the system quickly and achieve the control effect of frequency coordination when the tie-line of the four-machine two-area model fails.

**Keywords:** automatic generation control; area control error; simulated annealing-particle swarm optimization (SA-PSO); parameter optimization; closed loop feedback

## 0 引言

随着经济的快速发展,人们对电力系统电能品质的要求越来越高,限于我国能源与需求不平衡的现状,远距离、大容量的输电格局初步形成,使得电网安全问题变得更加复杂,系统频率问题也日益凸显<sup>[1-2]</sup>。这种交直流混联、异步联网的输电方式一旦发生直流闭锁或多回直流换相失败等问题时将引发系统频率振荡,严重时甚至导致整个系统失稳<sup>[3]</sup>。当系统受到大扰动或发生故障时,一次调频已无法使系统实际频率回到额定频率附近,只能通过附加二次调频来协同实现频率控制<sup>[4]</sup>。现阶段,二次调频主要通过自动发电控制(automatic generation control, AGC)实现。

自动发电控制是维持电网频率、联络线交换功率控制的一项重要技术,为系统安全稳定运行提高了保障<sup>[5]</sup>。文献[6]提出了一种将分数阶 PID 应用于互联电网 AGC 的方法,且验证了该方法能使 AGC 具有较好的非线性适应能力。文献[7]提出了一种基于输出比例因子的模糊经典控制器,由灵敏度分析证明了该方法对系统参数,步长负载扰动的大小和位置具有广泛变化的鲁棒性。文献[8]指出云南与南方电网主网异步联网后,曾多次出现 AGC 超调引起的电网频率波动现象,通过对 AGC 超调引起的频率波动机理的研究和对频率波动实例的分析,指出通过调整比例增益的方法可抑制该原因导致的系统频率波动。

虽然近年来,国内外对高压互联电网频率协调控制做

收稿日期:2018-10-19

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(51007034)、云南省自然科学基金(2010CD023)、昆明理工大学人才引进项目(2011-03)资助

了很多研究, AGC 在电网频率协调控制方面的学术研究成果也较多, 但迄今仍存在 AGC 跟踪性能欠佳、协调能力差、最优参数值获取难等问题。本文针对 AGC 参数优化问题提出了一种结合模拟退火(simulated annealing, SA)和粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)两者优点的模拟退火粒子群寻优算法, 通过该算法对 AGC 参数寻优以获得使系统恢复稳定最快的最优参数组。由该寻优算法得到的最优参数组形成具有闭环反馈功能的 AGC 控制器, 以仿真验证其协调控制性能。

### 1 AGC 控制系统

自动发电控制是调度中心利用实时采集到的系统频率、联络线交换功率按照一定的控制策略, 根据机组实发功率和系统运行状况, 平衡负荷波动的一种闭环反馈控制技术<sup>[9]</sup>。AGC 的控制逻辑结构如图 1 所示。

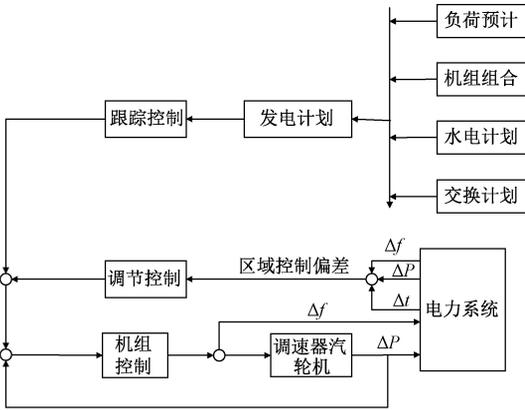


图 1 AGC 的控制逻辑结构

#### 1.1 联络线功率偏差

图 2 所示为两互联区域电气等值电路, 假设区域 1 的等值电抗值为  $X_1$ , 区域 2 的等值电抗值为  $X_2$ , 联络线的等值电抗值为  $X_T$ , 联络线首末两端的电压分别为  $U_1$  和  $U_2$ , 相角分别为  $\delta_1$  和  $\delta_2$ , 则区域 1 到区域 2 的联络线有功功率  $P_{12}$  为:

$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X_T} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (1)$$

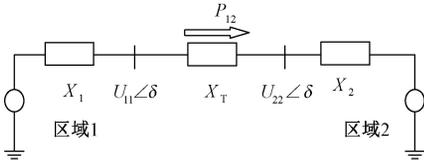


图 2 两互联区域电气等值图

当联络线功率发生微小变化时, 有:

$$\Delta P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta \delta_1 = \delta_1 - \delta_{10} \\ \Delta \delta_2 = \delta_2 - \delta_{20} \\ \Delta \delta_{12} = \Delta \delta_1 - \Delta \delta_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta P_{12}$  为联络线有功功率的变化量;  $\delta_{10}$ 、 $\delta_{20}$  分别为联络线首末两端电压的初始相角, 即初始稳态值;  $\Delta \delta_1$  为联络线首端相角变化量;  $\Delta \delta_2$  为联络线末端相角变化量;  $\Delta \delta_{12}$  为联络线首末端相角变化量之差。

将式(3)代入式(2), 联络线有功功率变化量  $\Delta P_{12}$  可简化为:

$$\Delta P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) \Delta \delta_{12} \quad (4)$$

将  $\Delta \delta = \int_0^t (2\pi \Delta f) dt$  代入式(4), 并经拉氏变换得到:

$$\Delta P_{12} = 2\pi \frac{U_1 U_2}{X_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) \frac{1}{s} \Delta f(s) \quad (5)$$

令  $T_{12} = 2\pi \frac{U_1 U_2}{X_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20})$ , 则有:

$$\Delta P_{12} = \frac{T_{12}}{s} \Delta f(s) \quad (6)$$

定义  $T$  为联络线同步系数, 联络线  $i$ 、 $j$  之间的联络系数  $T_{ij}$ , 其表达式如式(7), 则交换功率如式(8)所示。

$$T_{ij} = 2\pi \frac{U_i U_j}{X_T} \cos(\delta_{i0} - \delta_{j0}) \quad (7)$$

$$\Delta P_{ij} = \frac{T_{ij}}{s} \Delta f(s) \quad (8)$$

#### 1.2 区域控制偏差

两互联区域简化图如图 3 所示, 假设两个区域有同样的静态频率偏差, 总的负荷变化为  $\Delta P_L$ , 此时系统频率偏差  $\Delta f$  可表示为式(9)。

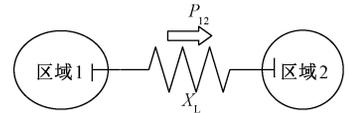


图 3 两区域互联简化图

$$\Delta f = \Delta \omega_1 = \Delta \omega_2 = \frac{-\Delta P_L}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) + (D_1 + D_2)} \quad (9)$$

式中:  $R$  为调差系数;  $D$  为负荷阻尼常数。

规定正的  $\Delta P_{12}$  表示从区域 1 到区域 2 传输功率的增加量, 即相当于区域 1 的负荷增加, 区域 2 的负荷减少, 即  $\Delta P_{12}$  反馈于区域 1 有负的符号, 对于区域 2 有正的符号, 则有:

$$\Delta P_m - \Delta P_{12} - \Delta P_{L1} = \Delta f D_1 \quad (10)$$

$$\Delta P_m + \Delta P_{12} = \Delta f D_2 \quad (11)$$

令  $\beta_1 = \frac{1}{R_1} + D_1$ ,  $\beta_2 = \frac{1}{R_2} + D_2$ , 从而可推得区域 2 有:

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_{L2}}{\beta_1 + \beta_2} \quad (12)$$

$$\Delta P_{12} = -\Delta P_{21} = \frac{-\Delta P_{L2} \beta_1}{\beta_1 + \beta_2} \quad (13)$$

通过以上公式推导, 定义区域控制偏差 (area control

error, ACE)由联络线功率偏差和加权的频率偏差构成,对于区域 1 区域控制偏差  $ACE_1$  为:

$$ACE_1 = \Delta P_{12} + B_1 \Delta f \quad (14)$$

式中:  $B_1$  为区域 1 的频率偏差系数,  $B_1 = \beta_1 = \frac{1}{R_1} + D_1$ , 单位为 MW/0.1 Hz, 取值为负。

ACE 反映了系统当前运行状态,系统内总发电量与负荷总需求的平衡情况,是电力系统调节的重要部分,为系统频率、功率调节提供了依据<sup>[10]</sup>。ACE 模块主要有以下 3 种工作方式。

1) 定频率控制 (flat frequency control, FFC), 其调节目标是使系统  $\Delta f = 0$  但调节代价很大, 缺点明显, 是更适用于孤网系统的一种频率控制方式, 其表达式为:

$$ACE = B \Delta f \quad (15)$$

2) 定联络线功率控制 (flat tie-line control, FTC), 理想情况下当  $\Delta P = 0$  时达到调节目标, 这种方式一般适合于小容量系统, 其表达式为:

$$ACE = \Delta p \quad (16)$$

3) 联络线功率频率偏差控制 (tie-line load frequency bias control, TBC), 在调控频率偏差  $\Delta f$  的同时调控  $\Delta p$ , 该方式被广泛使用于大区域互联系统, 其表达式为:

$$ACE = B \Delta f + \Delta p \quad (17)$$

## 2 AGC 控制参数

控制系统品质优劣通常可以通过系统的性能响应指标反映出来。最常使用的系统性能响应指标主要有两种: 一种是基于系统闭环响应特性的单性能指标, 包括超调量、最大动态偏差、调整时间、振荡周期等<sup>[11]</sup>; 另一种是从系统开始运行到系统稳定整个过程的误差性能指标<sup>[12]</sup>。要得到较好的控制效果, 改善控制系统品质就需要对控制参数进行调整, 当参数与被控对象特性相符合时, 控制效果为最佳<sup>[13]</sup>。AGC 控制参数主要包括频率偏差系数  $B$  和 AGC 控制器参数。因 PI 控制原理简单, 运算方便, 易于使用, 具有较强的鲁棒性, 被广泛运用于 AGC 控制器<sup>[14]</sup>。AGC 控制器如图 4 所示。

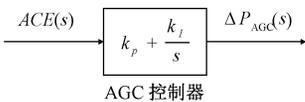


图 4 AGC 控制器框图

图 4 中  $k_p$  为比例增益系数;  $k_i$  为积分增益系数;  $ACE(s)$  为复频域内的区域控制偏差;  $\Delta P_{AGC}(s)$  复频域内调频机组需要调节的总功率值。AGC 控制器参数  $k_p$  和  $k_i$  的大小决定了 AGC 控制器的调节特性, 在设定时应与被控对象匹配, 过大过小都不能获得较好的控制效果。图 5 所示给出了电力系统一次调频与 AGC 协同调节频率维持系统稳定的调节框图。

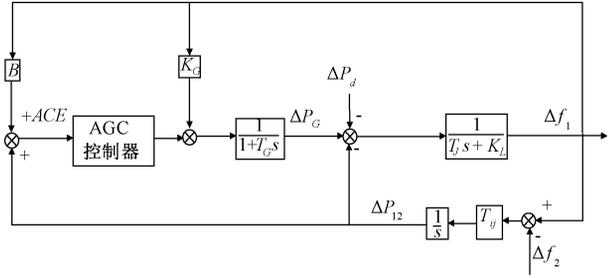


图 5 频率调节框图

图 5 中,  $\Delta f_1$  为区域 1 的频率偏差;  $\Delta f_2$  为区域 2 的频率偏差;  $\Delta P_d$  为系统扰动负荷;  $\Delta P_G$  为发电机输出功率变化量;  $B$  为频率偏差系数;  $K_G$  为系统总的发电机单位调节功率;  $T_G$  为发电机功率调节惯性时间常数, 其数值为原动机、水轮机等动力设备的响应时间有关;  $T_1$  为电力系统惯性时间常数;  $K_L$  为负荷单位调节功率。

由图 4 和 5 可得到该控制系统的传递函数, 并推导 AGC 控制器参数  $k_p$  和  $k_i$  的表达式, 从式 (18) 可知 AGC 控制器参数  $K_p$ 、 $K_i$  的设定取决于电力系统单位调节功率和惯性时间常数两个因素。

$$\begin{cases} K_p = \frac{0.9 T_J T_G}{K_s} + \frac{5 K_s}{6(K_L K_G + T_J)} \\ K_i = K_p \frac{T_G T_J}{2 K_s} \frac{30 K_G T_J + 3 K_L T_G + 3 T_J}{10 K_L T_G + 10 T_J + 9} \end{cases} \quad (18)$$

## 3 模拟退火粒子群算法

现今, 较多的智能优化算法被广泛运用于电力系统, 如模拟退火算法、蚁群算法、遗传算法、梯度下降法、人工神经网络、深度学习和粒子群优化算法等<sup>[15]</sup>。就粒子群算法而言, 其依托群鸟觅食的模型寻找最优值, 原理简单、收敛速度快, 可同时利用个体局部信息和群体全局信息搜索最优值, 需要调整的参数少, 容易实现<sup>[16]</sup>, 但传统的粒子群算法收敛受粒子运行影响大, 搜索行为粗糙, 不容易发现全局最优目标值, 在处理高维度复杂问题时, 可能出现早熟收敛现象等不足<sup>[17]</sup>, 而与各种优化算法相比, 模拟退火算法在寻优过程中模型相对比较简单且无限制, 具有较强的局部搜索能力, 能够跳出局部最优的寻优态, 收敛快, 算法中的公式参量少, 易解决系统的离散变量问题, 也不会出现“维数灾”, 但对于整个搜索空间掌握能力不够好, 搜索效率低。为了弥补粒子群算法的不足, 取消对速度的边界限制, 克服全局容易陷入局部最优等缺点。通过对模拟退火和粒子群算法优缺点的比较分析, 提出一种粒子群改进算法。该算法通过增加惯性权重因子来提高粒子群算法的全局寻优能力, 通过模拟退火算法改进惯性权重因子, 采用调节因子来确保算法的收敛性。本文提出的方法更适用于复杂高阶系统, 以性能指标为目标函数进行参数优化, 方法简单, 目标性强, 具体改进如下。式 (19) 为改进算法的速度公式,

式(20)为改进算法的位置公式。

$$V_{id}^{k+1} = \frac{2}{|2 - (c_1 + c_2) - \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - 4(c_1 + c_2)}|} \cdot [V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{gd}^k)] \quad (19)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (20)$$

式中： $c_1$  和  $c_2$  为加速常数，均为非负数； $r_1$  和  $r_2$  为在  $[0,1]$  范围内变换的随机数； $V_{id}^k$  为粒子  $i$  第  $k$  次迭代的速度； $P_{id}^k$  为粒子  $i$  第  $k$  次迭代的个体极值； $P_{gd}^k$  为粒子  $i$  第  $k$  次迭代的群体极值； $X_{id}^k$  为粒子  $i$  第  $k$  次迭代的位置。

由以上公式可知，主要通过 在粒子群速度公式中加入调节因子  $\psi$  来实现算法的改进。调节因子  $\psi$  可表示为：

$$\psi = \frac{2}{|2 - (c_1 + c_2) - \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - 4(c_1 + c_2)}|} \quad (21)$$

该改进算法定义区域控制偏差最小为适应度目标函数，其表达式为：

$$\min J = \int_0^1 |ACE| dt \quad (22)$$

式中： $t$  为仿真结束时间或数据采集终止时间； $J$  为区域控制偏差累加和的最小值。

将该改进后的算法运用于 AGC 控制器参数的寻优，从取值到形成闭环反馈控制整个过程如图 6 所示，设置寻优的参数为全局变量，基于 SA-PSO 进行循环寻优，在设定范围内不断更新参数值，判断目标函数区域控制偏差是否达到适应度函数条件，直到寻找到最优解位置或循环迭代次数用完为止。两区域在系统发生故障或受到扰动后的区域控制偏差累加和  $J$  越小，则说明振荡累计的能量越小，系统恢复稳定越快。

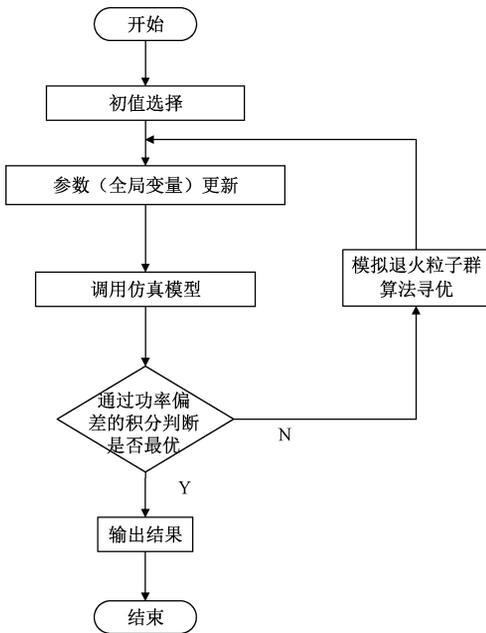


图 6 基于改进算法的模型参数寻优流程

### 4 仿真实验与分析

从电力系统中采集得到的频率偏差信号和联络线功率偏差信号由 ACE 计算模块根据 3 种不同的计算方式求出 ACE 值，结合 AGC 控制策略和系统反馈的机组运行状态，最终下达机组调节指令使 AGC 机组动作，AGC 仿真如图 7 所示。由于定频率控制和定联络线控制调节代价大，缺点明显，且本文研究的是区域电网互联系统，故本文采用 TBC 的控制方式。

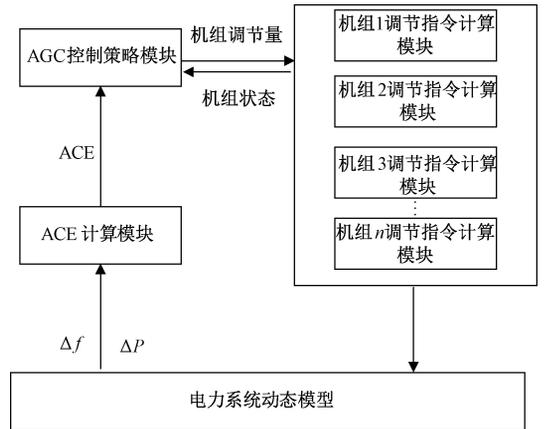


图 7 AGC 仿真框图

以两区域互联系统为仿真算例，用四机两区域模型验证改进后的 AGC 控制器对系统的控制效果，系统结构如图 8 所示。该 AGC 控制器参数是用上述第 3 节的模拟退火粒子群优化算法寻优得到，具体数值如表 1 所示。

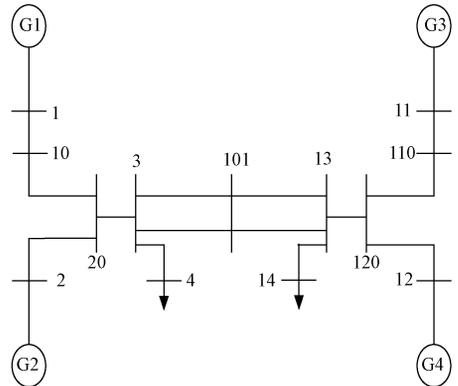


图 8 四机两区系统结构

表 1 AGC 控制器参数

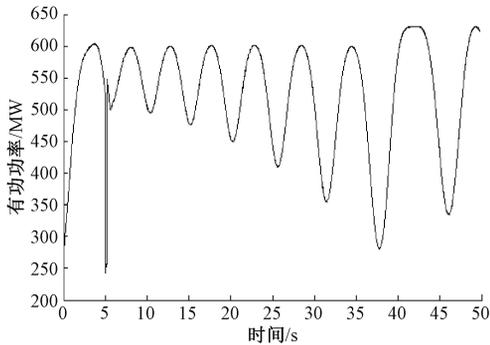
参数	$K_P$	$K_I$
改进 AGC 控制器	1.9	0.52

模型中在 4 台机组的调速侧均加装 AGC 控制，AGC 仿真模型参数如表 2 所示。在 MATLAB/Simulink 中设置 AGC model 为 0 表示在调速侧投入传统的 AGC 控制；

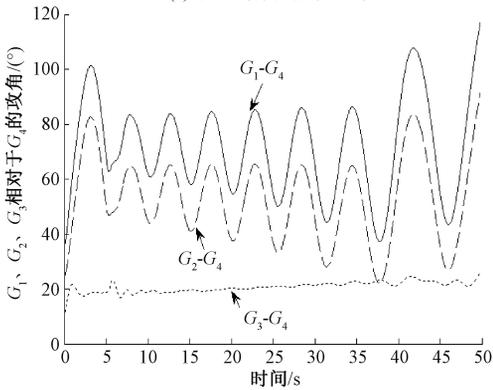
AGC model 为 1 则表示在调速侧配置由本文所提算法设计的改进 AGC 控制。仿真时间设置为 50 s, 设置运行到 5 s 时两区域系统的联络线突然发生三相接地的短路故障, 故障持续了 0.2 s, 即在 5.2 s 时故障才消除, 由该四机两区域系统仿真得到波形如图 9 所示。

表 2 AGC 仿真模型参数

参数	数值
调速器时间常数	0.06
调速器速度调节常数	2.8
电力系统时间常数	23
发电机时间常数	0.29
频率偏差因子	0.5
联络线功率同步系数	0.7
电力系统增益	120



(a) 联络线有功功率曲线

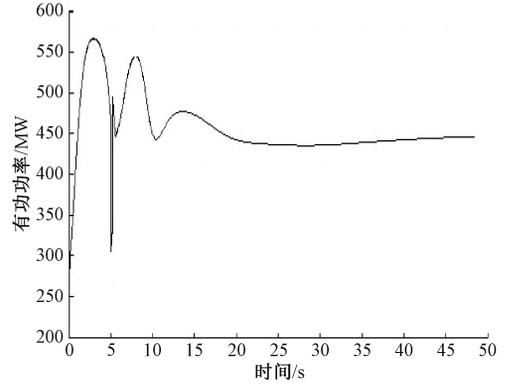


(b) 发电机  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  相对于  $G_4$  的功角仿真曲线

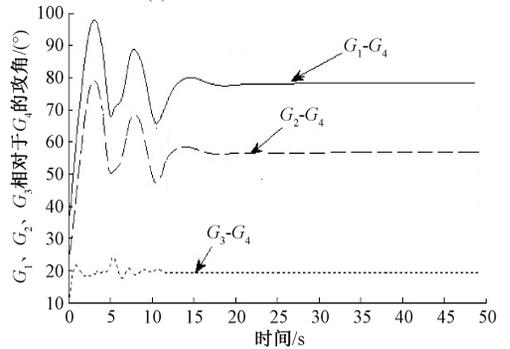
图 9 发生三相接地故障后系统各变量仿真波形

图 9(a)、(b) 所示分别为三相短路后两区域联络线有功功率时域仿真曲线和发电机  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  相对于  $G_4$  的功角仿真曲线, 可观察到在 5 s 时系统受到一个大的扰动, 联络线功率随着仿真时间的推移一直做增幅振荡, 区域 1 外送功率最低降到 240 MW, 最高值升到 597.34 MW, 联络实际交换功率与计划交换功率存在较大的偏差, 发电机  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  相对于  $G_4$  的功角曲线也一直在做增幅振荡, 系

统频率与工频也存在一个较大的偏差, 系统最高频率甚至达到 50.7 Hz, 此时若不采取任何措施该互联系统甚至会发生失稳。在 MATLAB/Simulink 仿真中, 设置 AGC model 为 0, 即在各发电机的调速侧投运传统 AGC 控制, 得到仿真波形如图 10 所示。



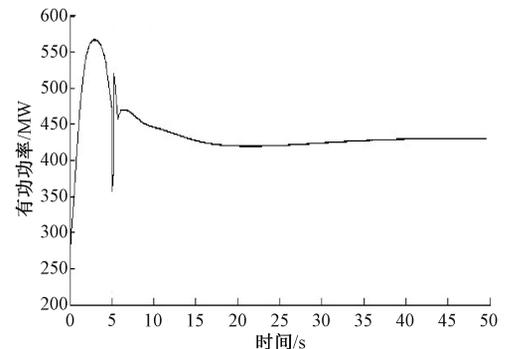
(a) 联络线有功功率仿真曲线



(b) 发电机  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  相对于  $G_4$  的功角仿真曲线

图 10 三相接地故障后投入传统 AGC 控制的各变量仿真波形

观察图 10 仿真曲线可知, 当系统发生三相短路时, 给系统投入传统 AGC 控制能起到抑制系统振荡的作用。联络线功率在 25 s 左右稳定于 450 MW, 而发电机  $G_1$  相对于  $G_4$  的功角最终也稳定于  $78^\circ$ , 发电机  $G_2$  相对于  $G_4$  的功角稳定于  $57^\circ$ , 发电机  $G_3$  相对于  $G_4$  的功角稳定于  $19^\circ$ 。在上述系统发生三相短路故障的情况下, 不投运传统 AGC 控制, 仿真模型 AGC model 值设置为 1, 各发电机调速侧投入改进 AGC 控制, 得到仿真波形如图 11 所示。



(a) 联络线有功功率曲线

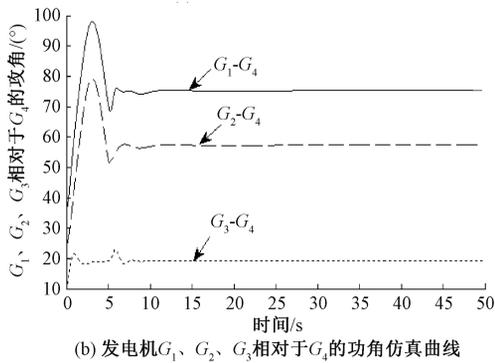


图 11 三相接地故障后加入改进 AGC 调节的各变量仿真波形

观察图 11 各变量仿真波形可知,联络线发生三相短路故障时投入改进 AGC 控制,系统可在 15 s 左右稳定于 420 MW,发电机的功角大概在 13 s 也趋于稳定。对比图 10 和图 11 可以看出,在系统结构和运行方式不变的情况下,系统发生的三相短路故障消除后,传统 AGC 控制与改进 AGC 控制均能起到抑制系统振荡的效果。为了进一步分析两种 AGC 控制的效果,表 3 所示给出了两种不同 AGC 控制三相短路故障时联络线功率波动统计值,而系统性能响应指标如表 4 所示。

表 3 联络线功率

控制方式	联络线功率波动/MW		
	最大值	最小值	稳态值
传统 AGC 控制	540	300	450
改进 AGC 控制	520	362	420

表 4 系统性能响应指标

响应指标	超调量/%	稳态误差/%	调整时间/s
传统 AGC 控制	20.0	8.95	25
改进 AGC 控制	23.8	1.21	15

由表 4 的数据可看出,改进 AGC 控制的稳态误差更小一些,调节精度更高,调整时间也更快。综合上述仿真结果,通过对系统发生故障以后,采用传统 AGC 控制与改进 AGC 控制的系统性能响应指标和稳定效果的比较,可以看出,改进 AGC 控制抑制系统振荡的响应时间更短,使系统达到新的运行平衡状态更快,具有更好的鲁棒性。以上仿真波形也验证了由模拟退火粒子群算法寻优得到最优参数组设计的闭环反馈 AGC 控制器对线路发生故障时导致的频率、功率振荡的抑制效果突出,满足系统的稳定运行指标,系统响应更好,维持系统稳定性能力更强。

## 5 结 论

维持系统频率、功率的稳定是电力系统安全运行的前提。当系统受到某个扰动时,一次调频会率先调节系统,但

系统受到扰动较大时,一次调频已无法使频率恢复到允许值,因此只能通过二次调频改变调速系统的给定值来实现无差调节,自动发电控制是实现二次调频的主要方式。相对于已有研究成果,本文提出的基于模拟退火粒子群改进算法寻优所得参数设计的闭环反馈 AGC 控制器考虑了 AGC 跟踪性能不高,参数最优值不易获得,控制效果不佳等不足。使用 MATLAB/Simulink 仿真分析在四机两区域模型的调速侧分别配置传统 AGC 控制和基于本文改进算法寻优设计的 AGC 控制,通过比较故障后投入传统 AGC 控制和投入改进 AGC 控制的各变量仿真波形,证明了进行参数寻优的重要性,验证了改进的 AGC 控制对高压互联网络频率协调具有较好的控制效果,能较快地使频率、功率恢复于设定值附近。

## 参 考 文 献

- [1] 瞿艳霞,马覃峰,时伯年. 柔性直流互联电网的孤岛频率快速控制技术[J]. 电力建设, 2017, 38(6): 73-79.
- [2] 王路平,谢小荣,刘颖,等. 多直流馈入受端电网短期频率稳定性的实时协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2205-2212, 2531.
- [3] 杨仲超. 异步联网系统直流双极闭锁后频率控制措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [4] 赵万宗,李滨,韦化,等. 互联电网 CPS 标准下计及一次调频的最优 AGC 控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2656-2664.
- [5] 艾小猛,廖诗武,文劲宇. 多区域互联电网主要联络线 AGC 控制性能评价指标[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 111-117.
- [6] 杨平,董国威. 互联电网 AGC 的分数阶 PID 控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 124-129.
- [7] YOGENDRA A. Automatic generation control of two-area electrical power systems via optimal fuzzy classical controller [J]. ScienceDirect, 2018, 16 ( 32 ): 2662-2688.
- [8] 徐敏,陈亦平,涂亮,等. 异步联网后 AGC 超调引起频率波动的问题分析[J]. 广东电力, 2017, 30(5): 81-86.
- [9] 王怀智,余涛,唐捷. 基于多智能体相关均衡算法的自动发电控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 620-627.
- [10] 李金龙,袁贵川,周剑,等. 基于特高压功率与电网频率偏差的省级电网 AGC 复合闭锁策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 108-114.
- [11] 赵炜. 基于蚁群算法的群智能理论在系统优化中的应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [12] DAMIR V, MIKULAŠ H, PAULO-MOURA O. PID controller tuning for integrating processes[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(4): 586-591.

- [13] 蒋世雨,张雪萍,李裕,等. AGC 中 PID 控制器的改进与研究[J]. 河南科学, 2018, 36(2): 186-192.
- [14] 杨平,董国威. 互联网 AGC 控制研究进展[J]. 华东电力, 2011, 39(9): 1488-1492.
- [15] 谢宏,李云峰,陈海滨,等. 混合粒子群算法优化支持向量机电路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 67-72.
- [16] 李成,吕柏权,王智磊. 基于分阶型的改进粒子群优化算法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(14): 35-40.
- [17] 郭巴秋,宋玉龙,宋策,等. 改进惯性权重的粒子群目标跟踪算法[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(1): 17-20,26.

### 作者简介

刘志坚,博士、教授、硕士生导师,主要研究方向电力系统运行与控制。

E-mail:248400248@qq.com

陈潇雅(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制。

E-mail:1602173023@qq.com

## 罗德与施瓦茨使用高通骁龙 X50 5G 调制解调器演示 3GPP 5G 的测试能力

罗德与施瓦茨公司和高通技术有限公司、高通股份有限公司的子公司成功验证了 5G NR 蜂窝网络 sub6G 的信令测试,这将 5G 的商用化又推进了一步。基于 R&S® CMX500 综测仪实现的端到端测试将首次在巴塞罗那世界通信大会展出,这一全新平台同 R&S® CMP200 和 R&S® CMW100 一起完善了 5G NR 终端设备测试的产品系列。



罗德与施瓦茨公司作为无线测试与测量领域的重量级供应商,宣布了使用高通骁龙 X50 基带芯片和集成了射频收发器,射频前端和天线单元的模组的智能终端尺寸的设备,完成基于 3GPP Release 15 版本非独立组网模式信

令验证。罗德与施瓦茨同高通公司的携手合作为 5G 的商用化铺平了道路。

### 为 5G 做好准备

罗德与施瓦茨从开发 GSM 系统模拟器开始就一直给无线通信产业提供可靠的、面向未来的测试测量解决方案,一直到目前的 LTE-Advanced Pro 技术。对于快速发布的 5G 标准,罗德与施瓦茨提供全面的产品系列,针对信令测试,5G NR 信令综测仪 R&S® CMX500 同 R&S® CMW500 宽带综测仪相结合提供测试方案。除 5G 信令测试之外,该方案还可以支持校准和非信令测试,并且也支持 LTE-A 相关的特性,如 5 个载波聚合和  $4 \times 4$  MIMO 等。

对于非信令测试,罗德与施瓦茨的 R&S® CMW100 综测仪可以覆盖 5G NR FR1 的研发、质检、综测、校准和生产等方面。罗德与施瓦茨研发的 R&S® CMP200 综测仪可以支持 5G NR FR2 毫米波频段的校准和综测。这个非信令的一体化测试方案提供了研发和生产阶段高效的射频参数测试。这些最新的测试方案可以满足客户的芯片、智能手机、平板电脑等设备的测试需求。

罗德与施瓦茨已于巴塞罗那世界移动通信大会上展示了 5G NR 终端测试的全面产品系列。关于展示的更多信息请访问:[www.rohde-schwarz.com/mwc](http://www.rohde-schwarz.com/mwc)。