

兼顾水电机组调节性能和经济性的水电厂AGC策略

李 滨, 麦章影

(广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:为了满足“两个细则”的要求以及充分调动水电厂提供调频辅助服务的积极性,对水电厂自动发电控制(AGC)策略中与调节性能关系密切的部分进行分析与设计,在保证机组安全性的前提下,通过对影响水电厂AGC的因素进行分析,引入与机组调节速率和调节精度相关的控制条件,在经济性目标的基础上加入参加AGC调节的机组数量最少的目标,建立水电厂AGC最优控制策略模型,确保水电厂机组AGC调节性能在电网考核合格的范围内,有效减少水电厂AGC的考核电量,保证水电厂AGC的调节品质并提高经济性。仿真结果验证了所提策略的有效性。

关键词:自动发电控制;控制策略;水电厂;“两个细则”

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202206021

0 引言

自动发电控制(automatic generation control, AGC)对电力系统的安全、优质、经济运行起着至关重要的作用。在区域电网特高压互联以及风电、光伏等新能源大规模接入的背景下,对频率控制的可靠性和快速性的要求有所提高,这增加了电网中机组启停和调度控制的难度^[1-2],且提高了对AGC的控制品质以及精确性的要求。AGC调节性能的差异使得各机组对电网的贡献大小也存在差别,如果这种差别在考核上得不到体现,就不能真正体现市场的公平性,也不能激励AGC机组性能的进一步提高以及运行实效的改善^[3]。因此,国家电力监管委员会制定了《发电厂并网运行管理规定》和《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》(简称“两个细则”),通过制定严格的考评和奖惩方法,鼓励发电厂提供优质的调频服务^[4]。这种考核模式虽然提高了并网机组参与AGC调节的积极性,但与以往按计划出力曲线运行相比,机组参与调频的调节深度更深,调节速率更快^[5],这就使得AGC调整速率加快、调节幅度增大以及频繁参与调整,导致AGC机组长期处于不良的工作状态,从而影响机组的寿命及整体的稳定度,而且厂用电率也会快速上升^[6]。如果机组在AGC中只追求调节速率,就会导致机组负荷变动过快等问题^[7],也会使得机组达不到考核标准的要求,还会形成无效扰动,损害电网的稳定。因此,自从电网“两个细则”考核办法实施以来,AGC调节的合格率较低,给

电厂造成了经济损失。

水电厂为满足“两个细则”的要求,需要进行AGC性能优化工作。常规水电厂AGC以经济、迅速和安全为原则,负荷分配主要采用等微增率或均匀分配负荷的方式。文献[8-9]采用人工智能优化算法优化AGC机组组合和启停次序,使经济负荷分配具有稳定性,并大幅减少迭代次数。振动是水电站运行过程中面临的问题之一,为消除水电机组进入振动区和跨越振动区对机组造成的影响:文献[10-11]运用区间数理论分析水电厂全厂可调区域及联合振动区与机组可运行区域之间的关系,使得机组在可行目标值内的穿越次数最少;文献[12]提出主动避振和主动穿越控制策略,将水电机组落入振动区范围的出力主动上拉或下拉至振动区外,实现机组避开振动区运行;文献[13]以振动区回避策略为研究重点,构建水电站实时经济运行模型,通过动态规划对水电站机组出力进行优化分配;文献[14]提出一种AGC动态分组轮换控制策略,根据电厂内AGC被调用的容量频度分布实现AGC机组分组,达到少量机组动以及机组尽量少动的目的。上述研究所提控制策略均取得了一定的效果,这些控制策略的目标主要是在实现经济调度、降低耗水率的基础上使机组避开振动区运行并优化机组组合,以及提高求解精度。对于AGC的调节性能,上述研究多采用调节速率、调节精度、响应时间等性能要素合成综合性能指标,并制定考核评价系统^[15]。但对于“两个细则”的3类指标和传统策略的结合,上述研究均没有进行充分的考虑,从而可能会使水电厂落入考核范围内,直接影响水电厂的经济效益。

本文通过分析水电厂AGC面临的电网对其调节性能考核严苛的问题,提出满足“两个细则”条件的水电厂AGC优化控制策略,在经济性模型的基础上,综合考虑机组出力的可靠性、机组的响应特性、

收稿日期:2021-11-05;修回日期:2022-03-04

在线出版日期:2022-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51767004);广西创新驱动发展专项(桂科AA19254034)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51767004) and Guangxi Special Fund for Innovation-driven Development(AA19254034)

经济性等多方面的要求,在目标中考虑参与 AGC 调节的机组数量最少,减少机组频繁参与调节;结合“两个细则”中对调节精度和调节速率的考核条件,构建相应的最优化数学模型,利用最优化理论进行求解,实现参与负荷调整的机组运行于稳定运行区内,并使调节速率和调节精度在允许范围内,使得 AGC 能在不同类型电厂、机组间进行分配,减少考核电量的产生,保证水电厂 AGC 的调节品质并提高经济性。

1 “两个细则”对水电厂 AGC 的考核

为保证电能质量,优化电力资源配置,保障电网安全稳定运行,针对各电厂在调节稳定性等方面的差异,2020 年国家能源局南方监管局对《南方区域发电厂并网运行管理实施细则》及《南方区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》^[16-17]进行新的修订,规定电厂应承担电网 AGC 等电网调节的责任,具体量化了并网机组参与 AGC 调节的性能指标,对达不到基本指标的进行电量考核。南方电网 2015 年版“两个细则”中的 3 个技术指标为调节速率、调节精度和调节范围,南方电网 2020 年版的 3 个技术指标更改为响应时间、调节速率和调节精度,具体指标要求如表 1 所示,表中对调节速率考核要求中的百分数为以额定容量为基准。

表 1 水电厂 AGC 考核指标

Table 1 Assessment index of AGC for hydropower plant

考核指标	南方电网 2020 年版		南方电网 2015 年版	
	考核要求	考核占比 / %	考核要求	考核占比 / %
响应时间	<20 s	25	—	—
调节速率	≥20 % / min	50	≥30 % / min	50
调节精度	≤1 %	25	≤3 %	25
调节范围	—	—	大于可调容量的 40 %	25

当 3 个技术指标的考核要求都满足时,合格率为 100 %。由表 1 可以看出:南方电网 2020 年版“两个细则”中对调节速率的考核要求为不小于 20 % / min,考核占比为 50 %,即要保证调节速率才能达到一半的合格率;南方电网 2020 年版“两个细则”中对调节精度的要求为 AGC 调节量误差不超过 1 %,相较于南方电网 2015 年版“两个细则”,对调节精度的要求提高了,要求水电厂 AGC 的调节性能更快、更准、更稳,这导致水电厂的合格率降低,使提供 AGC 服务的机组与普通机组的收益差别不大,并且 AGC 机组由于频繁调节加速了自身老化,增加了自身维护成本,综合来看,提供 AGC 服务可能“不赚反亏”,影响水电厂的经济效益。此外,目前没有明确调用调频机组的原则,机组是否参与 AGC 服务与其发电成本高低、调节性能好坏、调节容量大小没有明确的关

系,这使调节性能好的机组无法充分发挥优势^[18],因此,水电厂 AGC 的发展应适应新形势下的电网调控和发展要求。

电网“两个细则”实施以来,对各发电公司的奖惩结果差异很大,同时南方电网统一调频的辅助服务市场已经启动,统一调频也需要“两个细则”对电厂进行约束,才能进行规范的管理,达到更好的调频效果。此外,电力市场中均引入了 AGC 运行性能指标,在指标的具体计算公式上,给予响应及时、调节速率快、调节精度高的调频资源更高的补偿费用。因此,AGC 机组的调节品质非常重要,如果想获得电网的奖励,就需要对电厂 AGC 机组进行相应的改进,提高投入机组的调节性能,使控制策略满足电网调度的要求,并提高机组负荷的动态响应速度和负荷调节品质。

2 水电厂 AGC 运行问题分析

表 2 为以南方电网 2015 年版、2020 年版“两个细则”为考核标准,某水电厂在 AGC 考核时段内的考核情况,表中考核率表示相应指标不合格数占所有指标总不合格数的比例。由表可知:在 3 项指标中,大部分是由于不满足调节速率和调节精度指标要求而引起电量考核;AGC 调节速率合格率较低,为 72.0 %,如果不考虑部分免考原因,实际的调节速率合格率就会更低,而调节速率指标在性能指标中占的比重最大,一旦考核不合格,将会降低一半的合格率;按照 2015 年版“两个细则”中对 AGC 调节精度的要求(≤3 %),AGC 调节精度合格率较高,为 97.6 %,而按照 2020 年版“两个细则”中对 AGC 调节精度的要求(≤1 %),AGC 调节精度合格率为 66.3 %,整个电厂收益将大幅降低。

表 2 某水电厂在 AGC 考核时段内的考核情况

Table 2 Assessment condition of a hydropower plant during AGC assessment period

考核指标	总考核次数	不合格次数	合格率 / %	考核率 / %
调节速率	2880	806	72.0	92.22
调节精度(≤3 %)	2880	68	97.6	7.78
调节范围	—	—	—	—
调节精度(≤1 %)	2880	971	66.3	—
响应时间(<20 s)	2880	0	100	0

水电厂 AGC 投运以来存在的主要问题如下。

1) AGC 运行速度过快缩短设备使用寿命。

AGC 调节速率的提升能在最短的时间内将机组的运行状态调整至目标值,但这要求 AGC 灵敏度必须保持在较高的状态,AGC 在高灵敏度下运行时,调速器也高速运转,这会导致设备在运行过程中需要承载较高的压力负荷,使得机械的整体损耗速度加快,也可能会出现机组在断电之后由于惯性无法停

止运行的现象^[19]。为了保障水电厂的经济效益、有效减少调节次数以及优化机组有功分配算法,将 AGC 运行出力调控至机组的振动区间外,可以实现装置磨损率的有效降低,增加机组的使用寿命。

2) AGC 难以满足调节速率考核的要求。

水电机组在 AGC 方式下的负荷调节十分频繁,有时调度下发的负荷指令的间隔时间不足 1 min,经常遇到一个负荷指令还没有调整到位就接收到下一个负荷指令的情况,这使机组长期在加负荷、减负荷之间频繁调节,再加上水电机组存在的反调效应以及 AGC 指令的通信延时等因素,使得一些大型水电机组在调整 20~40 MW 的小负荷指令时,很难达到细则要求的速率。同时由于水电机组存在振动区,水电机组穿越振动区,会使得机组振动和摆度增大以及机械部件磨损增加,甚至会造成机组机械部分和厂房的损坏^[10]。而 AGC 机组根据负荷指令频繁地变化,使得机组经常穿越或停留在振动、气蚀区运行,导致机组的安全性和经济性均降低。为了躲避振动区,可能会出现 AGC 机组调节速率不合格的现象。

3) AGC 调节方式简单,影响调节速率和调节精度。

目前大多数水电厂采用监控大闭环调节的负荷调节方式,调速器设置为开度模式运行,即由监控系统上位机将 AGC 负荷分配指令下达到机组现地控制单元(local control unit, LCU),由机组 LCU 向调速器发出“增”“减”脉冲,调速器按调节脉冲来控制导叶开度,从而实现负荷的调整。在这种方式下,指令需经过多次转换,这使得脉冲调节的精度有所下降,导致机组 AGC 调节速率和调节精度达不到既定的目标,较难满足“两个细则”的相关要求^[20]。

3 基于“两个细则”的水电厂 AGC 最优控制模型

3.1 建模构思

电力系统中的 AGC 问题是一个大规模混合整数非线性优化问题,旨在满足系统负荷需求、功率上下限值、发电机组运行技术要求等约束条件的情况下,合理地安排不同发电机组出力,使整个系统要求的目标值最小。

在 AGC 模式下,为了提升水电厂 AGC 调节性能,以尽可能满足电力行业和调度机构的各项要求,本文在传统经济目标的基础上,加入参与调节的机组数量最少的目标,考虑“两个细则”的考核要求,以不低于调节速率的考核指标加入控制策略,使机组在最大调整时间内进行调节,同时满足调节精度的考核指标要求,有效促进机组组合优化,实现负荷分配时间性与经济性的良好结合,由此构建基于“两个细则”的水电厂 AGC 最优控制策略模型,并利用最优优化理论和算法进行求解。

3.2 数学模型

3.2.1 决策变量

控制策略的目的是根据有功调整量,在机组间实现负荷的分配,因此将机组的 AGC 有功分配值 P_i^t 设置为决策变量。为了能观测并统计参加 AGC 调节的机组情况,设置一个辅助变量 u_i , 表示机组 i 参与 AGC 调节的标识,其为一个 0-1 变量,若机组 i 参与 AGC 调节,则其值为 1, 否则为 0。因此,模型的决策变量为:

$$\mathbf{x} = [P_1^t, P_2^t, \dots, P_N^t]^T \quad (1)$$

$$u_i = \begin{cases} 1 & |P_i^t - P_i^0| > \alpha \\ 0 & 0 \leq |P_i^t - P_i^0| \leq \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为所有机组参与 AGC 调节后的出力; N 为机组总数; α 为电网“两个细则”的调节精度值,等于机组的额定容量与调节精度考核指标的乘积; P_i^0 为机组 i 参与 AGC 调节开始时刻的出力。

3.2.2 目标函数

1) 经济性目标。

在保证水电厂和电力系统安全运行的条件下,以经济性为原则,确定水电厂机组运行工况。水电厂中负荷合理分配的目标是在满足一定约束条件的前提下,尽可能节约消耗水量,水电厂总成本与各发电机组耗量特性间的关系函数为:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^N [a(P_i^t)^2 + bP_i^t + c] \quad (3)$$

式中: f_1 为水电厂总成本; a 、 b 、 c 为水电厂耗水量特性曲线参数,其值与机组性能相关。

2) 机组动作次数最少目标。

根据实际运行情况,如果要求每个出力点都在满足电网调节要求的同时达到经济分配,则在调节出力时,有些机组增加出力,有些机组减小出力,这可能会降低全厂负荷的响应性能,导致机械设备经常处于工作状态变化之中,使机组的故障率增加,造成机组损耗,给机组寿命带来不利影响。因此,应当使 AGC 调用的机组数量最少,即:

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^N u_i \quad (4)$$

式中: f_2 为参与 AGC 调节的机组数量。

3.2.3 约束条件

1) 出力限值约束。

不同水头下的机组出力限值往往有较大的变化,机组出力上限受水电厂水头和库容的制约,需要根据测试来确定。机组越限运行或者长期运行于低负荷区会对机组设备产生影响,应设置机组出力限值来保障机组的运行,即:

$$\begin{cases} P_{i,\min} \leq P_i^t \leq P_i^0 & P_{\text{set}} < 0 \\ P_i^0 \leq P_i^t \leq \bar{P}_{i,\max} & P_{\text{set}} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{P}_{i,\max}$ 、 $\underline{P}_{i,\min}$ 分别为机组 i 的最大、最小出力值; P_{set} 为调度下发的总的有功功率调整额。

2) 振动区约束。

振动是影响水电厂相关机组正常运行的最大因素,甚至会损坏机组以及威胁厂房安全,因此,在机组间分配 AGC 控制量时要尽量避开振动区,避免机组在振动区运行或者频繁穿过振动区,从而减少对机组的损害,即:

$$(P_i^t - \bar{Z}_i)(P_i^t - \underline{Z}_i) > 0 \quad (6)$$

式中: $\bar{Z}_i$ 、 $\underline{Z}_i$ 分别为机组 i 振动区的上、下限。

3) “两个细则”约束。

(1) 调节精度约束。

机组调整后的出力应保持在目标值,但在实际运行中,机组的出力会在目标值附近发生微小波动,调节精度约束为实际出力 and 目标出力间的差值要处于允许的范围,即:

$$\left| \sum_{i=1}^N (P_i^t - P_i^0) u_i - P_{\text{set}} \right| \leq K_p \sum_{i=1}^N P_{i,s} u_i \quad (7)$$

式中: $P_{i,s}$ 为机组 i 的额定容量; K_p 为“两个细则”中的调节精度考核指标。

(2) 调节速率约束。

调节速率是指正常情况下 AGC 机组响应增、减负荷指令的速率,包括上升速率和下降速率。从延迟过程结束时刻开始,机组的出力不断变化,直到达到目标调整量。调节速率约束为:

$$\frac{|P_i^t - P_i^0|}{P_{i,s} K_s} \leq T_i \quad (8)$$

$$0 \leq T_i \leq T_{i,\max} \quad (9)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$; K_s 为“两个细则”中调节速率指标; T_i 为机组 i 的调节时间; $T_{i,\max}$ 为机组 i 的最大调节时间,水电机组的功率调节性能较好,通常在机组出力从空载到满载的过程中,负荷上升时间短于 1 min,在全厂有功功率控制调节下,采用比例-积分-微分 (proportional-integral-differential, PID) 调节方式并选择合适的 PID 系数,可使机组在接收到给定功率突变值后的 30 s 内实现 70% 功率增量的调节,并在 1 min 内完成调节过程。

4 仿真分析

4.1 条件设置

本文仿真采用同一座电厂中的 6 台同类型水电机组,其参数如附录 A 表 A1 所示。为了验证本文所提方法的有效性,分别将 6 台机组投入 AGC,进行全厂 AGC 增、减负荷测试,标记每次参与调节的机组,计算每次机组调节后的出力和目标函数值。为了保证本文仿真的准确性,对调节开始时刻机组的出力以及有功调整额进行随机设置。

4.2 仿真结果分析

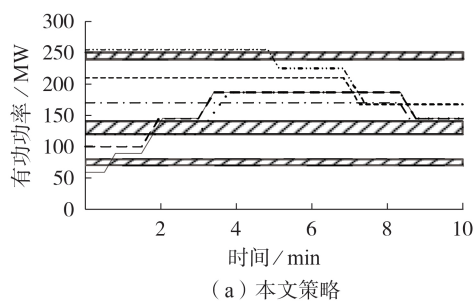
选取某个时段的 10 min 进行一个完整考核过程的仿真分析。总功率指令下令情况如表 3 所示。为了验证本文策略的有效性,设置 2 种对比分配策略:策略 1,采用传统的按照可调容量进行功率分配,并按可调容量设置机组调节优先级,按振动区宽度设置调节步长;策略 2,采用文献[14]中的 AGC 动态分组轮换控制策略,按 AGC 容量被调用的频度分布将全厂参与 AGC 运行的机组分为 AGC 即应机组和 AGC 后备机组,采用动态规划法在 AGC 即应机组间进行负荷分配。分别采用 3 种不同的策略在相同的下令点以及下令值内进行调节,观察各机组的变化情况。

表 3 总功率指令下令情况

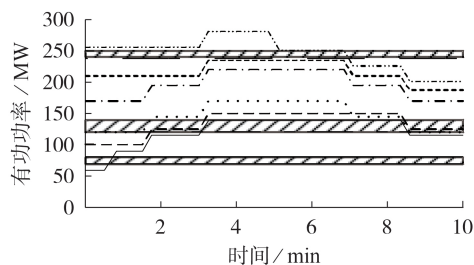
Table 3 Ordering condition of total power command

下令点	负荷 / MW	下令点	负荷 / MW
1	30	4	-30
2	100	5	-100
3	150	6	-150

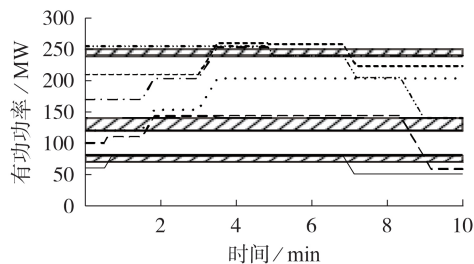
在各分配策略下,6 台机组的下令情况和出力变化情况如图 1 所示。图中:前 4 min 为下达增加负



(a) 本文策略



(b) 策略 1



(c) 策略 2

— G₁, --- G₂, G₃
- · - G₄, - - - G₅, - · - G₆

图 1 不同策略下各机组出力变化情况
Fig.1 Output variation of each unit under different strategies

荷指令时 3 种策略下机组出力的变化情况,4 min 后为下达减少负荷指令时 3 种策略下机组出力的变化情况;阴影区域表示机组的振动区。

策略 1 下,在响应每次总功率指令时,由于安排了多数机组参与调节,整体调节速率较快,能较快地完成一个调节指令。但多数机组参与调节会使机组经常处于变化之中,增加了机组损耗,并且策略 1 中没有任何对振动区的约束,机组可随意跨越或停留在振动区内,由图 1(b)可见,调节结束后有机组进入振动区并且在振动区运行,这给机组安全稳定运行带来了巨大的影响。策略 2 中对振动区的约束要求是达到振动区的上下界,由图 1(c)可见,调节中也有较多的机组选择跨越振动区,这同样不利于机组的稳定运行。

本文策略下,在平稳调节时期,机组保持在振动区之间的可调节区域运行,当机组进入振动区时,将机组快速拉出振动区,避免机组长时间在振动区运行。图 1(a)中,在 1—3 min,机组 G_1 — G_3 优先增加出力以跨越振动区,缩短了停留在振动区的时间,在 8—10 min,机组 G_1 — G_6 减少出力到达振动区边界,大幅减少了跨越振动区的次数。当区域调节需求较大时,AGC 下发指令引导机组沿调节出力方向跨越振动区,实现机组出力全量程范围的连续调节。表 4 为机组综合控制情况。由表可知,本文策略下的 AGC 机组跨越或停留振动区次数相较于策略 1 减少了 44.4%,相较于策略 2 减少了 54.5%,这说明本文策略能在一定程度上减少机组跨越或者停留振动区的次数。

表 4 机组综合控制情况

Table 4 Integrated control condition of units		
策略	跨越或停留振动区次数	总调节次数
本文策略	5	13
策略 1	9	22
策略 2	11	16

在调节开始各机组出力相差较大时,会向经济性目标的要求靠拢,如图 1(a)所示,机组 G_1 当前出力要小于其他机组,当增加负荷时,为了使各机组出力趋于一致,会在经济性范围内使当前出力较小的机组增加一定的负荷,使当前出力较大的机组保持负荷不变。当减少负荷时,将优先使当前出力较大的机组减少负荷,使当前出力较小的机组保持负荷不变,这样就不会出现图 1(c)中机组 G_1 最终调节到运行下限的情况。当调节前机组所剩余的可调容量不多而调整额较大时,将会出现多台机组共同承担调节任务的情况,当有机组出力达到限值时,参与调节的机组数量增加,保证机组不越限运行。在进行一些小负荷指令调整时,由图 1(c)可知,策略 2 下机组 G_3 在下令点 4 进行了一个很小范围的调节,而在图 1(a)中只有机组 G_6 在规定的范围内进行动作,不

仅规避了一些小调节量,而且进行动作的机组数量比策略 2 下的要少。

参与调节的机组数量取决于调节前机组的出力值。由附录 A 图 A1 所示不同策略下各机组的下令情况可知,策略 1 和策略 2 下,多数机组进行了调节,本文策略下,部分机组出力保持不变,只有小部分机组在规定范围内进行动作,减少了进行动作的机组数量。如表 4 所示,本文策略下 AGC 机组的总调节次数为 13,相较于策略 1 减少了 40.9%,相较于策略 2 减少了 18.8%,这说明在使机组出力与相邻机组相差不大且满足经济性目标时,采用本文策略可调用较少的机组进行调节,即能够在一定程度上减少参与 AGC 考核的机组数量。

为了满足“两个细则”的考核要求,本文在模型的设置中加入了时间的限制要求,即要求机组在规定的时间内完成调节,当机组的调节时间超过限制时间时,调节速率就会不达标,从而产生考核费用。要避免调节速率考核的产生,就要增加新的机组来分担负荷,将调节速率限制在合理的范围内。本文策略能够在规定的时间范围内调整参与 AGC 的机组数量,从而满足考核的要求;策略 1 比本文策略调用的机组多,耗费的时间相对较少,满足时间的限制要求;而策略 2 规定了参与 AGC 的机组数量,在调节大负荷时不能满足调节速率的要求。

各机组的调节补偿情况如附录 A 表 A2 所示。由表可知:本文策略的补偿费用与其他策略的差别不大,这说明机组通过参与 AGC 辅助调频能得到一定的补贴;通过减少考核和减少调用的机组数量,能显著提升电厂在调频辅助服务中所获得的补偿费用,且能提升机组的可用效率和寿命;本文策略的经济性目标耗水量比其他策略的更小,因此采用本文策略更能节约成本以及获取更大的收益。

5 结论

本文对水电厂机组 AGC 策略中与调节性能关系密切的部分进行分析与设计,综合考虑机组出力的可靠性、机组的响应特性、经济性等多方面的要求,构建一种基于“两个细则”条件的水电厂 AGC 优化控制策略模型,通过仿真可以得到如下结论:

1) 本文所提方法可以根据电网投入的水电 AGC 机组情况,对 AGC 机组进行实时优化,使其在“两个细则”的考核范围内进行调整,同时以较少的总调节次数实现更好的控制效果,为电网提供优质高效的 AGC 调频服务;

2) 采用本文策略进行 AGC 时,水电厂 AGC 机组可避开振动区运行,减少了跨越振动区的次数,提高了电网运行的可靠性和安全性,同时能提升机组的可用效率和寿命,对保证水电厂 AGC 的调节品质具有重要作用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张海波,段洁琼,奚耀冕,等. 计及储能SOC恢复的孤岛直流外送AGC模型预测控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 199-204.
ZHANG Haibo, DUAN Jieqiong, XI Yaomian, et al. AGC model predictive control of islanded HVDC sending end considering SOC recovery of energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 199-204.
- [2] 伍凌云,何笠,杨可,等. 基于特高压和超高压直流互联的送端电网AGC系统控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 183-188.
WU Lingyun, HE Li, YANG Ke, et al. AGC system control strategy of sending power grid interconnected with UHVDC and EHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 183-188.
- [3] 王轶禹,马世俊,皮俊波,等. 关于国调直调电厂“两个细则”的讨论[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 174-179, 186.
WANG Yiyu, MA Shijun, PI Junbo, et al. Discussion on two rules for power plants directly dispatched by state grid electric power dispatching and control center[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 174-179, 186.
- [4] 陈雪梅,陆超,刘杰,等. 考虑调频性能考核的储能-机组联合调频控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3383-3391, 3664.
CHEN Xuemei, LU Chao, LIU Jie, et al. Control strategy considering AGC performance assessment for BESS coordinated with thermal power unit in AGC[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3383-3391, 3664.
- [5] 高嵩,李军. 基于AGC指标考核的机组控制问题与对策研究[C]//2013年中国电机工程学会年会论文集. 成都:中国电机工程学会, 2013: 2207-2211.
- [6] 杨荣照,陈亦平,夏成军,等. 高比例水电系统AGC稳定性分析及控制策略优化[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 880-886.
YANG Rongzhao, CHEN Yiping, XIA Chengjun, et al. Stability analysis and control strategy optimization of AGC with high-proportion hydropower system[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 880-886.
- [7] 王晨光. 以抽水蓄能电站为主要调频手段的电网AGC控制策略[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
WANG Chenguang. Research on AGC control strategy based on pumped storage power station[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [8] 胡飞,张德虎,杨晓春,等. 基于蚁群算法的水电站AGC机组组合与负荷分配优化[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 123-126.
HU Fei, ZHANG Dehu, YANG Xiaochun, et al. Optimal load distribution and commitment of automatic generation control units in hydropower station based on ant colony algorithm[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(12): 123-126.
- [9] 王永强,周建中,肖文,等. 多种群蚁群优化算法在大型水电站自动发电控制机组优化组合中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 66-70.
WANG Yongqiang, ZHOU Jianzhong, XIAO Wen, et al. Application of multi-colony ant optimization in optimal commitment of automatic generation control units in large-scale hydropower station[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 66-70.
- [10] 徐玮,何毅斌,王春明. 调整水电厂自动发电控制运行中振动区处理策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 122-128.
XU Wei, HE Yibin, WANG Chunming. Vibration zone treatment strategy for AGC of regulating hydropower plant[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 122-128.
- [11] 余意,伍永刚,刘兴龙. 考虑机组穿越振动区风险的水电站AGC日前经济负荷分配策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2673-2682.
YU Yi, WU Yonggang, LIU Xinglong. Study on daily economic load distribution strategy of hydropower station AGC based on risk control of unit crossing vibration zone[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2673-2682.
- [12] 杨秀媛,樊新东,陈麒宇. 考虑振动区的水电厂控制策略及其在风水协同运行中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5433-5441, 5591.
YANG Xiuyuan, FAN Xindong, CHEN Qiyu. Control strategy of hydropower plant considering vibration region and its application in coordinated hydro and wind power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5433-5441, 5591.
- [13] 艾学山,赵陈炜,薛源,等. 水电站实时经济运行振动区回避策略研究[J]. 水力发电, 2016, 42(1): 74-77, 97.
AI Xueshan, ZHAO Chenwei, XUE Yuan, et al. Study on real-time economic operation strategy of hydropower station after considering vibration area avoidance[J]. Water Power, 2016, 42(1): 74-77, 97.
- [14] 伍永刚,何莉,余波. 大型水电厂AGC调节策略研究[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 109-112.
WU Yonggang, HE Li, YU Bo. A study on strategy of AGC for large hydropower plant[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(4): 109-112.
- [15] 吴继平,谢旭,郭磊,等. 基于实际跟踪数据统计分析的机组调节能评价指标[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 163-169.
WU Jiping, XIE Xu, GUO Lei, et al. Unit regulation performance indices based on statistical analysis of real tracking data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 163-169.
- [16] 国家能源局南方能监局. 南方区域发电厂并网运行管理实施细则[EB/OL]. [2020-12-31]. http://120.31.132.37:16001/portal-oa/unauth/readPdf?filePath=/biz/DOC_SEND/888.pdf.
- [17] 国家能源局南方能监局. 南方区域并网发电厂辅助服务管理实施细则[EB/OL]. [2020-12-31]. http://120.31.132.37:16001/portal-oa/unauth/readPdf?filePath=/biz/DOC_SEND/888.pdf.
- [18] 董超,郝文焕,董锴,等. 南方(以广东起步)调频辅助服务市场机制设计与运营实践[J]. 广东电力, 2020, 33(6): 12-19.
DONG Chao, HAO Wenhuan, DONG Kai, et al. Mechanism design and operation practice of frequency regulation auxiliary service market in Southern China (starting from Guangdong)[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(6): 12-19.
- [19] 郑锡恩,武广辉,寇吉田. 水电厂机组AGC运行影响分析及控制策略[J]. 科技创新与应用, 2018(15): 125-126.
- [20] 倪宏伟,盛锴,李正家. 水电厂AGC控制系统性能分析及其优化应用[J]. 湖南电力, 2016, 36(1): 43-45.
NI Hongwei, SHENG Kai, LI Zhengjia. Performance analysis and optimized application of AGC for hydroelectric plant[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(1): 43-45.

作者简介:



李 滨

李 滨(1975—),女,副教授,博士,主要研究方向为电力系统最优化(E-mail: lizhen@gxu.edu.cn);

麦章影(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统最优化(E-mail: 1029144617@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第139页 continued on page 139)

On-grid and off-grid coordinated control strategy of microgrid based on Van der Pol oscillator and PQ control

LUO Long^{1,2}, LI Yaohua^{1,2}, LI Zixin^{1,2}, ZHAO Cong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive

(Institute of Electrical Engineering of Chinese Academy of Sciences), Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve the problems of slow dynamic response and poor current-sharing performance of the traditional multi-layer nested on-grid and off-grid droop control system in microgrid, an on-grid and off-grid coordinated control strategy of microgrid based on Van der Pol virtual oscillator controller (VOC) and PQ control is proposed. When the microgrid is on-grid, the off-grid VOC is introduced with grid-connected current feedback, and its resonance parameters and voltage ratio are closed loop adjusted, so that the VOC is always in the hot standby state, which not only enables each power generation unit in the microgrid have good dynamic performance of PQ control, but also realizes smooth switching between on-grid mode and off-grid mode. After the microgrid turns to off-grid operation, VOC parameters are also closed loop adjusted, so as to realize the load voltage compensation at the point of common coupling (PCC) in the microgrid and better current-sharing control for each power generation unit. The relationship between the synchronization controller of VOC parameters and PCC voltage is given, and the synchronization mechanism is analyzed theoretically. The simulative results show that the proposed control strategy can effectively improve the dynamic response in on-grid operation and current-sharing performance in off-grid operation of the microgrid, compared with the traditional droop control-based on-grid and off-grid coordinated control strategy.

Key words: microgrid; virtual oscillator; on-grid and off-grid control; PQ control; coordinated control

(上接第 112 页 continued from page 112)

AGC strategy of hydropower plant considering regulation performance and economy of hydropower plant

LI Bin, MAI Zhangying

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to meet the requirements of “two rules” and fully mobilize the enthusiasm of hydropower plant to provide frequency regulation auxiliary service, the parts closely related to regulation performance in automatic generation control (AGC) strategy of hydropower plant are analyzed and designed. On the premise of ensuring the safety of the units, the control conditions related to the unit regulation rate and regulation accuracy are introduced through the analysis of the factors affecting AGC of hydropower plant. On the basis of economy object, the object of minimum number of units participating in AGC adjustment is added, an optimal control strategy model of AGC for hydropower plant is built, which ensures AGC regulation performance of units in hydropower plant within the range of qualified power grid assessment, effectively reduces the assessment power quantity of AGC for hydropower plant, and ensures the regulation quality of AGC for hydropower plant and improve the economy. The effectiveness of the proposed strategy is verified by the simulative results.

Key words: AGC; control strategy; hydropower plant; “two rules”

附录 A

表 A1 水电机组主要参数

Table A1 Main parameters of hydro generator units

参数	参数值
额定容量	302.5 MW
出力上限	302.5 MW
出力下限	50 MW
振动区	70~80 MW、120~140 MW、240~250 MW
平均调节速率	100 MW/min
耗水量特性	$f = 0.0015(P_i^t)^2 + 0.8P_i^t + 2$

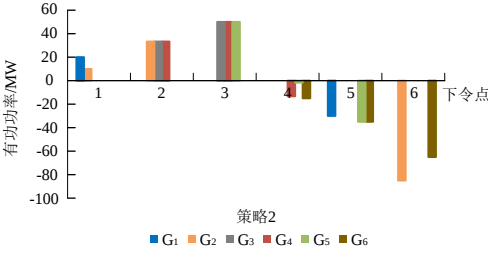
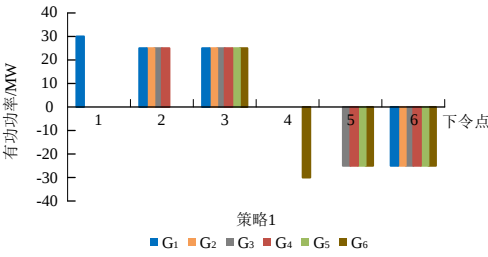
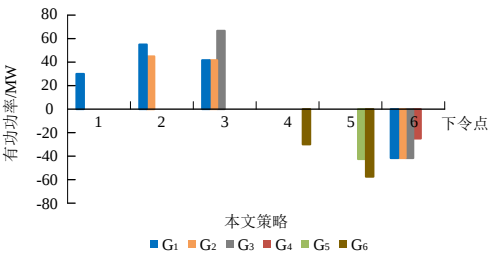


图 A1 不同策略下各机组下令情况

Fig.A1 Ordering condition of each unit under different strategies

表 A2 各机组补偿情况
Table A2 Compensation of each unit

策略	机组	正调频里程/MW	负调频里程/MW	补偿费用/元	总补偿费用/元	耗水量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
本文策略	G ₁	126.67	-41.67	1 935.91	6 440	954
	G ₂	86.67	-41.67	1475.91		
	G ₃	66.67	-41.67	1245.91		
	G ₄	0	-25.00	287.50		
	G ₅	0	-42.50	488.75		
	G ₆	0	-87.50	1 006.25		
策略 1	G ₁	80.00	-25.00	1 207.50	6 440	964
	G ₂	50.00	-25.00	862.50		
	G ₃	50.00	-50.00	1 150.00		
	G ₄	50.00	-50.00	1 150.00		
	G ₅	25.00	-50.00	862.50		
	G ₆	25.00	-80.00	1 207.50		
策略 2	G ₁	20.00	-30.00	575.00	6 440	1 005
	G ₂	43.30	-85.00	1 475.45		
	G ₃	83.50	0	960.25		
	G ₄	83.50	-13.30	1 113.20		
	G ₅	50.00	-36.70	997.05		
	G ₆	0	-115.00	1 322.50		