

热电联产机组的控制优化策略研究

叶晨¹, 李红军², 唐志东¹, 崔双喜³, 孙凯¹

(1. 国网江苏省电力有限公司淮安市洪泽区供电分公司, 江苏 淮安 223100;

2. 国网安徽省电力有限公司检修分公司, 安徽 合肥 230000;

3. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 针对风电机组的调峰能力不足导致弃风问题依然突出, 分析了系统热惯性对热电联产机组控制的作用, 认为热电联产机组常规控制系统的发电负荷响应的跟随性存在较大时间的延迟, 不能满足快速性响应要求, 无法实时参与调峰, 并提出了一种改进的控制方案来解决这一问题。通过 Matlab/Stateflow 仿真软件进行验证, 仿真结果表明, 改进后的控制方案显著优于常规控制方案, 发电负荷响应指标响应快速, 跟随性能良好, 为热电联产机组参与电网调峰提供了先决条件。

关键词: 热惯性; 负荷响应; 热电联产

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)02-0007-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.002

Research on Control Optimization Strategy for Co-generation Unit

Ye Chen¹, Li Hongjun², Tang Zhidong¹, Cui Shuangxi³, Sun Kai¹

(1. Huai'an Hongze District Electric Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Huai'an 223100, Jiangsu, China; 2. Maintenance Branch, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China; 3. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China)

Abstract: Aiming at the problem that abandoning wind is still prominent because of the insufficient peak load regulation capacity of wind turbine, the effect of thermal inertia of the system on the control of co-generation unit is analyzed. It is considered that the follow-up of generation load response of conventional control system of co-generation unit is delayed for a long time, which cannot meet the requirements of fast response and cannot participate in peak load regulation in real time, so an improved control scheme is proposed to solve this problem. Through the Matlab / Stateflow simulation software, the results show that the improved control scheme is significantly better than the conventional control scheme, the response of power load response index is fast and the follow-up performance is good, which provides the preconditions for co-generation units to participate in grid peak load regulation.

Key words: thermal inertia; load response; combined heat and power

0 引言

中国“三北”地区冬季是风电高发季节。当前, 为满足冬季供暖增长的需要, 电力系统中热电联产机组的容量逐年上升, 占比越来越大^[1]。为做好冬季风电消纳工作, 增加电网调峰容量, 热电联产机组必须在负荷允许调节范围内参与电网调峰。

基金项目: 国家自然科学基金(51467020, 11762021)

当前, 集中供热系统热力工况控制大部分只考虑稳态情况, 即由当前的户外温度及当天统计的日平均供、回水温度来调节供热系统稳定运行, 以此达到供热的稳定性^[2]。但此种方法无法反映供热系统运行的动态特性。一般情况下, 一天中热网负荷趋于稳定导致热电联产机组的输出功率在一天中的变化不太明显^[3]。这就是热电联产机组(承供热负荷)难以参与电网调峰的主要瓶颈。

此外,由于电力系统和热力系统的特性不同,电能的“发、输、配、用”具有瞬时性,而热力系统由于自身介质的传输特性(热量的变化具有时间效应)且管网具有一定的储热特征,所以,对于热力系统而言,其时间的相关性比较强^[4]。通过分析供热工况,可以发现:供热量(这里为供热水温差)经过突变再恢复到原有状态时对室温的影响并不明显,表明集中供热系统蓄热能力很强。正是由于供热系统这种蓄热特性(热惯性),当负荷在较短时间增加或减少,并不影响供热用户的取暖体验^[5]。这样,供热机组可以利用这部分储能应付短时间内的负荷变化,从而使热电厂参与电力调峰成为可能。

下面研究工作的核心是利用热网储能,使供热机组参与电网调峰并提高其负荷响应速度的问题。

1 常规的控制方法

热电联产机组是一个多输入、多输出的被控对象。输入有锅炉燃料量、抽汽蝶阀开度、汽轮机高调门开度;输出有汽轮机中压缸排汽压力、汽轮机机前压力、机组发电负荷。当前普遍采用的热电联产机组控制方法为锅炉燃料量控制汽轮机前压力;汽轮机高调门开度控制机组发电负荷;汽轮机中压缸压力由调节蝶阀来调整^[6]。常规控制方法的结构图如图1所示。

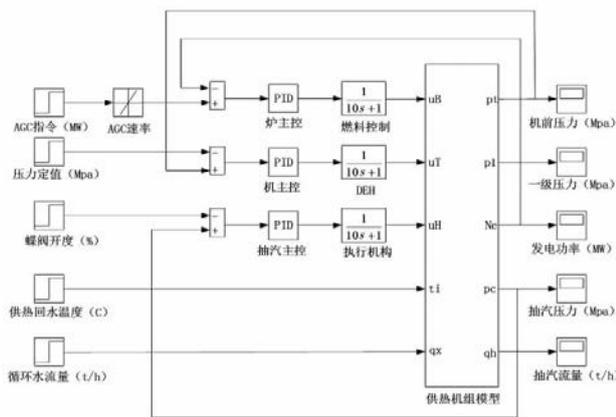


图1 常规控制方法的结构

热电联产机组额定发电负荷指令(AGC)通过速率约束后即为实际发电指令,一般发电负荷指令设定为每分钟调节1.5% P_e (P_e 为额定负荷),对于300 MW机组,通过计算可知其发电负荷速率约为4.5 MW/min。供热回路汽轮机抽汽压力经调整调节阀开度来控制。锅炉主控输出到控制燃烧系统:为响应锅炉主控输出变化,相应的锅炉给煤量也要随之调整,一次风量、二次风量均需乘以一不同系数进行修正以适应锅炉主控输出变化,在此选择一

阶惯性环节 $1/(10s + 1)$ 来描述;汽轮机同样也选择一阶惯性环节 $1/(10s + 1)$;对于抽汽蝶阀开度的变化速率,控制系统一般采用惯性或者限速环节来约束,这里也用一阶惯性环节 $1/(10s + 1)$ 来描述。下面对热电联产机组在不同工况下的运行特性进行分析,首先看一下常规控制系统在额定发电负荷工况、额定供热负荷工况下的运行性能。

热电联产机组常规控制系统方案原理如图2所示。

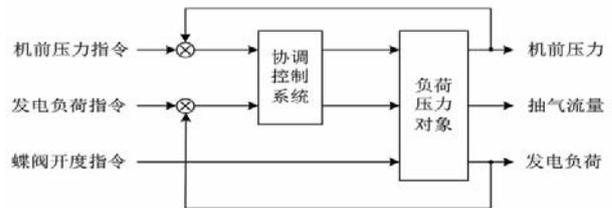


图2 常规热电联产机组控制系统原理

下面对常规控制方法分别在热电联产机组额定发电负荷、额定供热工况下对其仿真分析。

1) 额定发电负荷工况

在额定发电负荷工况下,常规控制系统的相关波形如图3至图9所示。

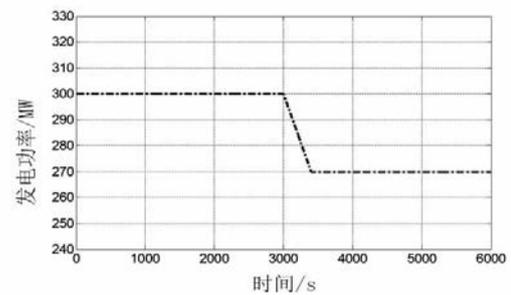


图3 额定发电负荷工况下 AGC 波形

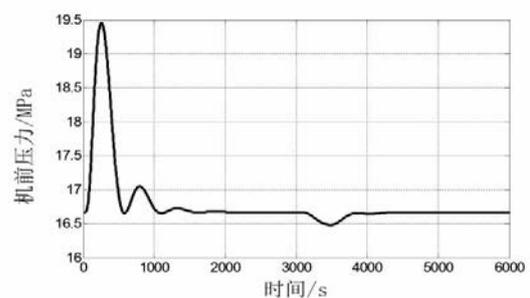


图4 额定发电负荷工况下机前压力波形

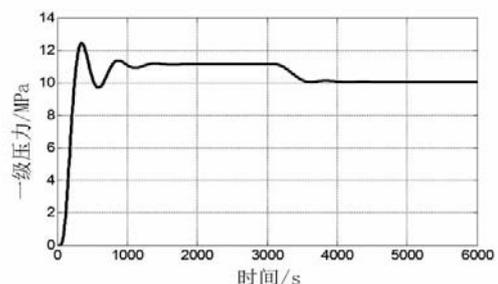


图5 额定发电负荷工况下一级压力波形

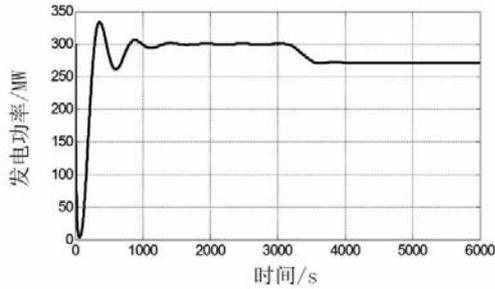


图6 额定发电负荷工况下发电功率波形

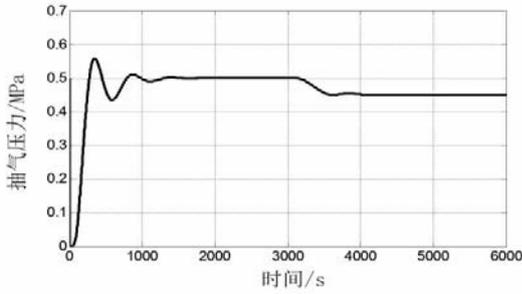


图7 额定发电负荷工况下抽汽压力波形

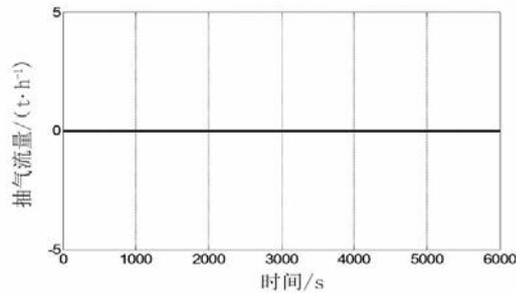


图8 额定发电负荷工况下抽汽流量波形

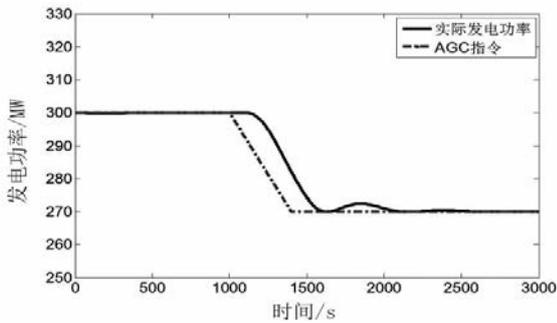


图9 额定发电负荷工况 AGC 给定及实际发电功率波形

整个系统仿真时间设置为6000s，仿真算法采用ode45，汽轮机前压力定值保持在16.67MPa，AGC指令在3000s时令以每分钟1.5% P_e 的变化速率由300MW下降到270MW，整个下降时间用了400s。为了获得最好的控制效果，系统的PID调节器的参数均采用枚举寻优法进行整定。由图3和图9可以看到，常规控制方案中机前压力波动并不大，在3480s时，压力偏差为0.2MPa，但发电负荷在3600h下降到270MW给定负荷，存在大约200s的延迟，并且随后又波动了500s左右才稳定下来。

2) 额定供热负荷工况

在额定供热负荷工况下，常规控制系统的相关波形如图10至图16所示。

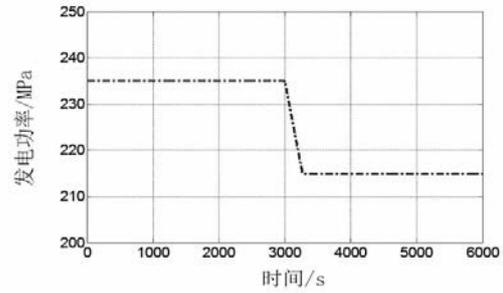


图10 额定供热负荷工况下 AGC 波形

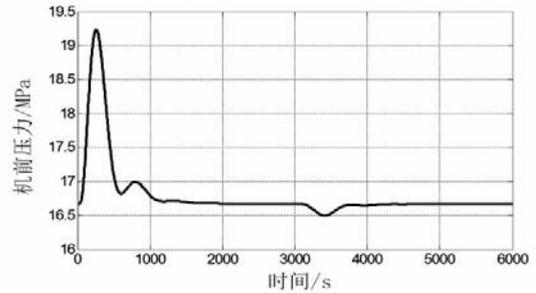


图11 额定供热负荷工况下机前压力波形

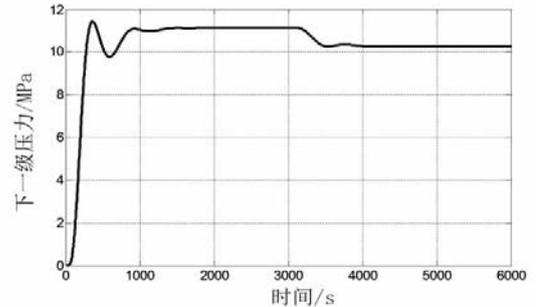


图12 额定供热负荷工况下一级压力波形

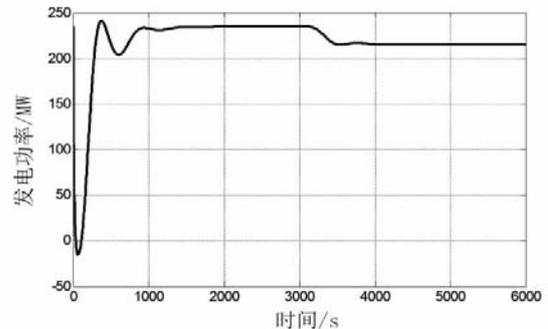


图13 额定供热负荷工况下发电功率波形

由10至图16可以看出，在额定供热负荷工况下，发电负荷指令由235MW下降到215MW（每分钟1.5% P_e 的速率），供热抽汽压力定值确定为0.35MPa，汽轮机前压力定值一直处于16.67MPa。机前压力偏差最大约为0.2MPa，发电负荷响应依然存在约200s的延迟。

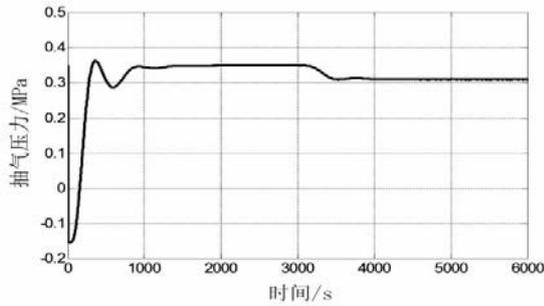


图 14 额定供热负荷工况下抽汽压力波形

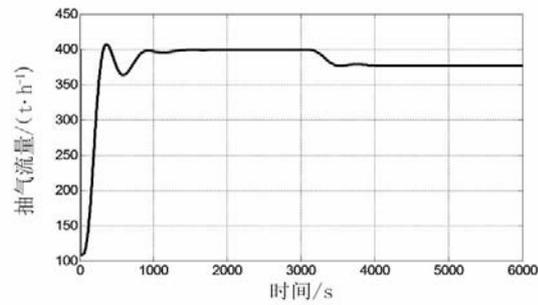


图 15 额定供热负荷工况下抽汽流量波形

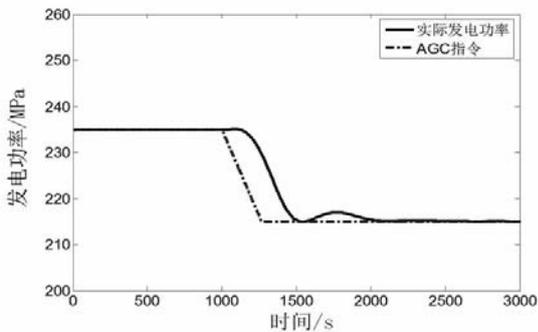


图 16 额定供热负荷工况 AGC 给定及实际发电功率波形

2 改进后的控制方法

由上述仿真结果及分析可知,常规控制方案中机前压力波动并不明显,但存在一个明显的不足,就是 AGC 的指令跟随性能差,延迟时间太长,不能满足电网快速性响应要求,无法实时参与电网调峰。要解决这一问题,需要考虑新的系统控制方案来提高系统发电负荷响应能力这一关键性能指标的快速性,这里提出一种基于热惯性的改进控制方案来解决这一关键的系统性能指标。新的方案利用锅炉燃料量控制机组发电负荷,汽轮机高调门开度控制汽轮机机前压力,通过改变供热抽汽调节蝶阀开度控制供热抽汽流量,优化后的控制系统发电功率能够快速跟踪功率指令变化。改进后的控制系统结构如图 17 所示。

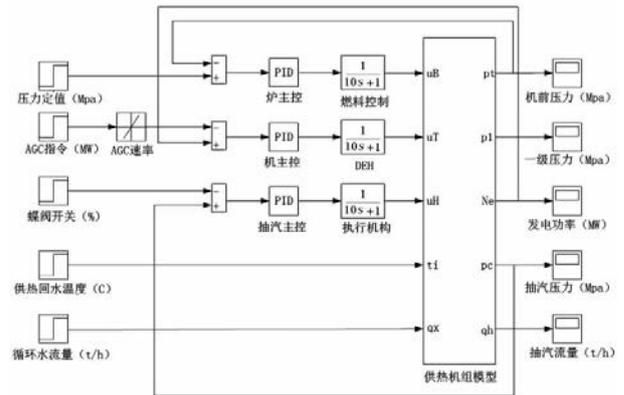


图 17 改进后的控制系统结构

改进后的热电联产机组控制原理如图 18 所示,通过引入非线性滤波器,将 AGC 指令分解成基本负荷指令和波动负荷指令两个部分。其中,基本负荷指令仍然由常规机组控制系统进行调控,而将蝶阀开度指令与惯性环节叠加之后,由波动负荷指令对蝶阀开度进行控制。

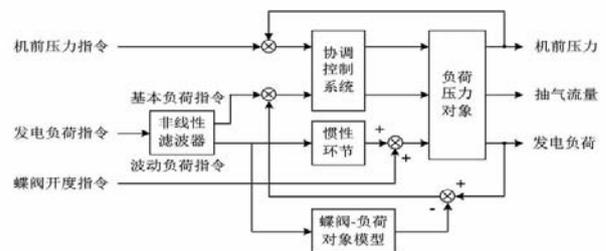


图 18 改进热电联产机组控制系统原理

对改进后的控制方案在额定发电负荷工况下和额定供热负荷工况下进行仿真分析,观察系统的相关运行情况。无论是额定发电负荷工况还是额定供热负荷工况,整体仿真时间都设定为 3000 s,其中在 1000 s 时,额定发电负荷工况下给定负荷由 300 MW 渐变到 270 MW;额定供热负荷工况下给定负荷由 235 MW 渐变到 215 MW。相关的波形如图 19 至图 24 所示。

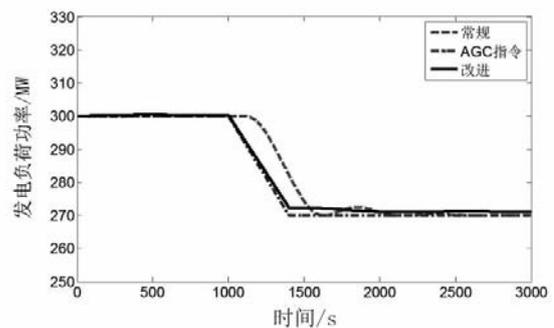


图 19 额定发电负荷工况下常规系统和改进后的系统发电负荷波形对比

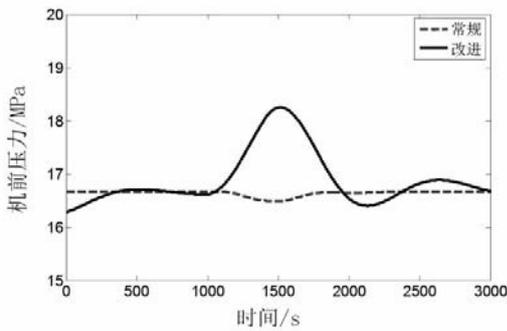


图20 额定发电负荷工况下常规系统和改进后的系统机前压力波形对比

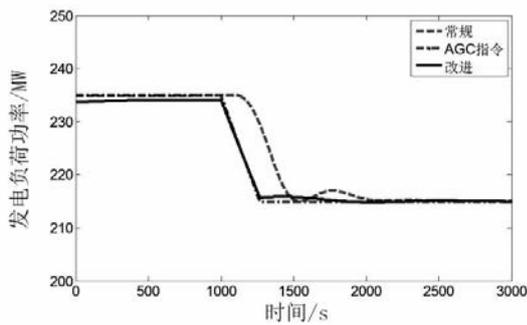


图21 额定供热负荷工况下常规系统和改进后的系统发电负荷波形对比

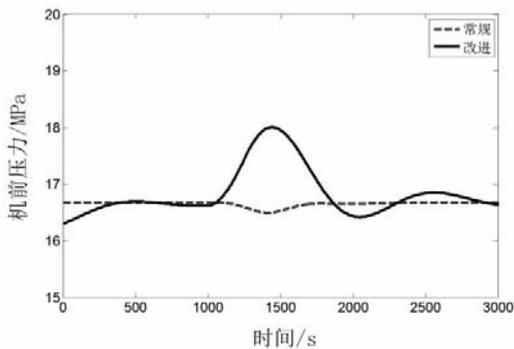


图22 额定供热负荷工况下常规系统和改进后的系统机前压力波形对比

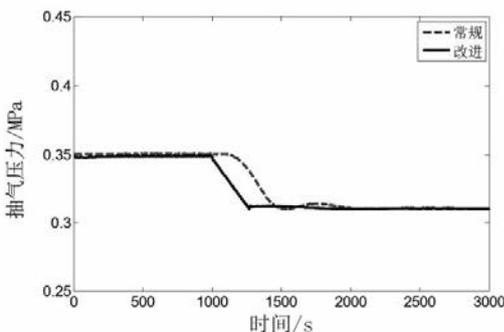


图23 额定供热负荷工况下常规系统和改进后的系统抽汽压力波形对比

对比常规控制方法和改进后的控制方法,可以发现:

1) 无论是额定发电负荷工况还是额定供热负荷工况,改进后的控制系统的机前压力波动都要大于常规控制系统,在额定发电负荷工况时,机前压力值最大达到 18.5 MPa;在额定供热负荷工况时,机前压力值最大达到 18 MPa。

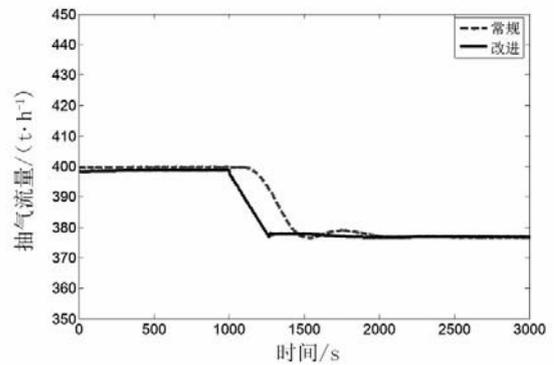


图24 额定供热负荷工况下常规系统和改进后的系统抽汽流量波形对比

2) 从图 19 和图 21 的发电负荷波形可以看出,系统无论工作在额定发电负荷工况还是额定供热负荷工况,改进后的系统控制方案中发电负荷的控制性能不管在跟随性还是在稳定性上,都要明显优于常规控制系统。

3) 从图 22 和图 24 的相关波形可以看出,由于在发电负荷的控制性能上,改进后的控制系统优于常规控制系统,相应地,在额定供热负荷工况下,改进后的控制系统的抽汽压力波形和抽汽流量波形优于相应的常规控制系统下的波形。

综上所述,改进后的控制方案优于常规控制方案,特别是改进后的控制系统发电负荷的跟随性能优异,能满足热电联产机组发电负荷控制的快速性要求,而发电负荷控制的快速性又是热电联产机组参与电网系统调峰的先决条件。

3 结 语

前面对热电联产机组的常规控制系统进行了分析,并在额定发电工况和额定供热工况下对其进行仿真,仿真结果表明常规控制系统对发电负荷响应这一重要指标的跟随性并不理想,存在大约 200 s 的时间延迟。利用锅炉燃料量控制机组发电负荷、汽轮机高调门开度控制汽轮机机前压力对热电联产机组控制方法进行改进,并将其与常规控制方法仿真对比,结果表明,改进后的控制系统在各种工况下

(下转第 16 页)

故障电压与短路电流的概率分布,同时该方法利用抽样计算,具有普遍性,对故障特性分析以及保护装置整定值的配置具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):184-192.

[2] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.

[3] 吴争荣,王钢,李海锋,等. 计及逆变型分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):92-96.

[4] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.

[5] Camacho A, Castilla M, Miret J, et al. Active and Reactive Power Strategies with Peak Current Limitation for Distributed Generation Inverters during Unbalanced Grid Faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3):1515-1525.

[6] 洪树斌,范春菊,陈实,等. PQ控制策略下多逆变型电源的故障等值方法[J]. 电网技术,2018,42(4):1101-1109.

[7] 张林利,彭克,苏建军,等. 含逆变型分布式电源的配电网故障分析通用计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(7):75-80.

[8] 郭文明,牟龙华,刘爽,等. U/f控制微电源的故障控制策略和故障模型分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):1125-1136.

[9] 曾德辉,潘国清,王钢,等. 含V/f控制DG的微电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2604-2611.

[10] Bracale A, Caramia P, Fazio A R D, et al. Probabilistic

Short Circuit Analysis in Electric Power Distribution Systems Including Distributed Generation [C] //Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2012), 8th Mediterranean Conference on. IET, 2012.

[11] Hetzer J, Yu D C. An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2):603-611.

[12] Abouzahr I, Ramakumar R. An Approach to Assess the Performance of Utility - interactive Photovoltaic Systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2):145-153.

[13] 李桓,彭克,张新慧,等. 基于IIDG电流相位控制的配电网故障电流抑制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):180-186.

[14] 李文立. 含分布式电源配电网的故障特性分析与保护方案研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.

[15] 潘国清,曾德辉,王钢,等. 含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):555-561.

[16] 陈光,戴攀,周浩,等. 计及入网电动汽车和分布式电源配电系统重构[J]. 电网技术,2013,37(1):82-88.

[17] 郑海峰. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[D]. 天津:天津大学,2006.

作者简介:

马子钦(1996),硕士研究生,研究方向为城市电网故障诊断;

廖凯(1989),博士,副教授,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等;

杨健维(1983),博士,副教授,研究方向为新能源电力系统保护与控制、城市电网安全预警、电动汽车并网。

(收稿日期:2020-02-24)

(上接第11页)

的发电负荷响应指标响应快速,跟随性良好,改进后的控制方案的综合性能优于常规控制方法。

参考文献

[1] 邱金鹏. 基于AHP-FCM的热电联产投资风险评估[J]. 四川电力技术,2019,42(2):91-94.

[2] 孙近文. 大中型风电场混合储能系统优化配置及先进控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

[3] 王琪. 风电规模化并网条件下供热机组优化控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.

[4] 王岑娇. 热电联合系统统一能量管理模型研究[D]. 沈

阳:沈阳工业大学,2019.

[5] 徐飞,闵勇,陈磊,等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5063-5072.

[6] 荣爽. 促进供暖期风电消纳的多热源容量规划与协调调度策略[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

作者简介:

叶晨(1992),硕士研究生,主要研究领域为新能源发电与控制技术;

唐志东(1980),高级技师,主要研究领域为新能源发电与控制技术。

(收稿日期:2019-12-12)