

· 运行分析 ·

基于用户可中断负荷的实时负荷控制决策技术应用

方超¹, 陈楚², 熊政¹, 宋煜¹

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210036)

摘要:当特高压直流严重故障时电网会采取紧急切负荷措施, 为了实现切负荷时的精准, 本文提出了基于用户可中断负荷的实时负荷控制决策技术, 研究了控制决策过程中涉及快速响应、精准控制、稳控保障等关键技术, 设计了用户动态序位表、决策准备、负荷循环补备、失效开关清单等决策中使用的机制, 最后模拟了实时控制决策的应用场景。本文提出的实时负荷控制决策技术已经在江苏电网大规模源网荷友好互动系统中应用, 实现了在接收切负荷指令后对用户可中断负荷实时精准控制。

关键词:快速响应; 精准控制; 稳控保障

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0108-05

0 引言

2018年, 江苏将建成国内首个省级特高压交流环网, 到2020年会形成特高压“六交四直”格局, 区外来电将超过55 000 MW, 占江苏总负荷42%, 成为国内最大的省级大受端电网^[1-4]。跨区域交直流输电通道面临因设备、外破、灾害、故障闭锁等原因而停运的风险, 特别是在大功率输送期间的突然停运, 将对江苏大受端电网的安全稳定运行造成较大的冲击, 影响供电安全^[5]。在故障发生时依靠调度员进行人工处置的方式常常会无法保留用户保安电源, 对用户影响较大, 存在负荷过控或欠控的可能, 已不能满足快速反应、精准控制的要求。因此江苏省电力公司提出建设大规模供需友好互动系统^[6-9], 在特高压直流出现故障时不再使用基于离线计算和典型方式的故障预案, 而是由调度直接发令, 通过基于用户可中断负荷的实时控制决策模块实现负荷精准控制, 避免保障大受端电网安全稳定运行, 提高江苏电网安全水平及抗事故能力, 实施需求侧精益管理^[10,11], 增强与客户互动^[12-14], 提高电力系统功率动态平衡能力^[15,16]。

1 实时控制决策总体框架

功能总体架构如图1所示。框架共分五层。第一层: 基础数据层, 缓存终端秒级采集的用户每条可中断出线线路负荷数据, 根据负荷特性对用户进行负荷分类管理, 保存常规控制、次紧急控制所需

的用户档案以及实时负荷; 第二层: 决策准备层, 根据需要的控制指令类型, 按照不同负荷控制策略的要求, 实时滚动生成用户动态序位表, 把负荷控制策略决策中较为耗时的过程前移; 第三层: 决策层, 通过消息总线接收来自调度的负荷控制指令, 在接收后进行指令解析, 根据指令要求快速决策出满足要求的负荷控制用户清单, 下发跳闸指令, 并实时计算控制效果; 第四层: 消息总线层, 承担控制指令下发、接收、执行、反馈全过程活动, 保障指令的有序执行。第五层: 数据交互层, 提供与负荷控制决策模块有交互的外部接口, 包括控制指令下发、终端跳闸控制、实时数据获取等相关接口。

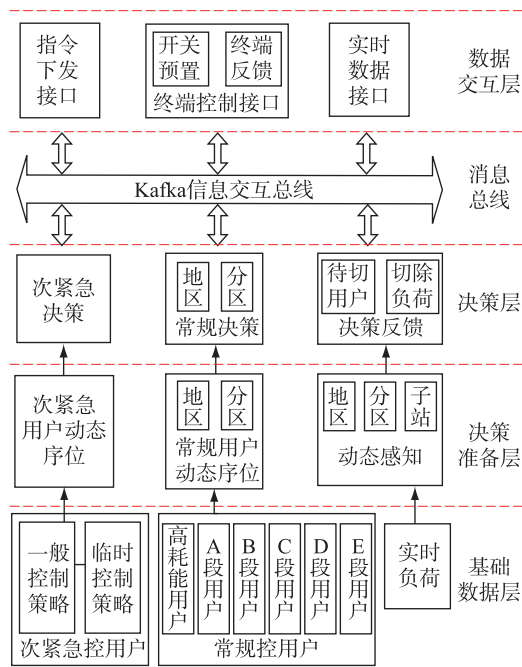


图1 实时控制决策

Fig.1 Diagram of real-time load control decision

收稿日期: 2017-02-07; 修回日期: 2017-04-01

基金项目: 国家电网公司科技项目(提升电力营销服务能力的大数据关键技术研究)

1.1 基础数据层

基于智能网荷互动终端设备,采取双光纤通道接入方式,实现用户负荷的动态感知。分析用户不同时段可中断负荷能力,聚合用户资源,实现负荷分类管理,提高在负荷控制时可中断负荷的能力。

根据控制指令的不同,基础数据层需准备一般控制策略下的次紧急控制(一轮控制,切除满足要求的所有用户)、临时控制策略下的次紧急控制(三轮控制,每轮切除指定负荷量)、常规控制(可以指定不同地区、不同切除负荷量)共3种策略基础档案数据,程序启动时自动加载到内存中。采用实时数据库缓存所有智能网荷互动终端采集的数据,实现数据的高效并发处理,保障数据的快速读写。

1.2 决策准备层

为了满足负荷控制指令的秒级响应,缩短在接收到控制指令后决策的时间消耗,在决策模块上层增加了决策准备层,把决策过程中根据当前负荷决策规则生成用户动态序位表的功能前移,在常规运行状态下保持用户动态序位表的滚动更新,为接收控制指令后的决策提供数据准备。通过决策准备层,实现决策的预准备、最大程度减少了决策的复杂性,提高了整个模块的稳定性与快速响应能力。

1.3 决策层

决策层接收控制指令,对控制指令进行分析,根据决策准备层已经准备好的动态用户序位表以及指令中需要控制的负荷量,从前向后累加动态序位表中用户的可切负荷,快速决策出用户清单,进而下发控制指令。决策过程中除了考虑效率,重点还要保障稳控,通过设计失效开关清单机制,剔除控制开关故障的用户,保障决策出的用户可达到预期负荷控制效果。决策下发用户后,还需对每户的控制情况进行监控,给出实际负荷切除效果,记录整个控制过程中所有相关步骤,执行痕迹管理。

1.4 数据交互层

整个负荷控制决策过程涉及多个系统不同模块之间的交互,为了实现控制指令在各环节中的传递,为此设计了基于Kafka(一种分布式消息系统)的消息总线交互机制来实现数据的流转。整个交互过程如下:负荷动态感知模块把当前地区可切负荷发送给调度全网协调控制模块,调度全网协调控制模块在特高压直流故障时会根据上层分析以及当前可切负荷下发具体的控制指令,负荷决策模块在接收到控制指令消息后进行用户快速决策,决策出的切负荷用户清单发送到终端控制模块,由此模块操作终端跳闸,结果发送到控制反馈模块,此模

块在所有用户跳闸结束后,把控制结果再发送到调度,完成控制指令的闭环,如图2所示。

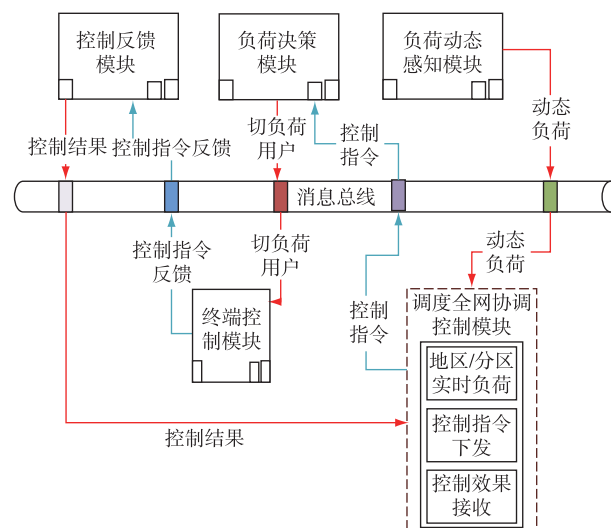


图2 数据交互

Fig.2 Diagram of data interaction

2 实时控制决策关键技术

2.1 快速响应

为了提高负荷控制决策的响应速度,将负荷控制决策分为决策准备层、决策层。决策准备层也为常态数据层,以秒级间隔定时计算数据;决策层在接收到控制指令后,利用决策准备层提供的数据和控制指令中的切负荷进行决策,如图3所示。

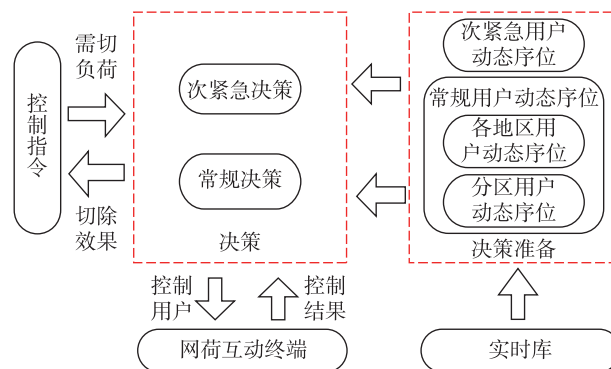


图3 快速响应

Fig.3 Diagram of quick response

2.1.1 决策准备

一般情况下的控制决策都是在接收到控制指令后,根据业务逻辑进行控制指令的分解,如果对决策时间有要求,效率提升的关键技术研究也专注于决策过程的功能设计和代码优化。而基于用户可中断负荷的实时控制决策,承担着特高压直流故障时根据控制指令决策出需要参与切负荷的用户,决策时间越短,故障恢复就越快,所以功能设计追寻的是尽可能快速。通过深入研究整个过程的各

个关键环节,把时间资源消耗最大的模块整体前移,创新地构建了决策准备层。在日常电网未发生故障的情况下就准备好决策时所需要的所有数据,大大降低了决策所消耗的时间。

决策准备根据需要的控制指令类型包括次紧急用户以及常规用户动态序位表的数据准备,次紧急用户动态序位表通过对不同轮次需要切除的负荷及次紧急用户控制策略进行分析,实现不同时间段次紧急用户的动态序位表。常规用户动态序位表根据区域分为地区用户动态序位表和分区用户动态序位表,通过对区域下用户的历史负荷和日平均负荷及常规用户控制策略进行分析,实现区域下不同时段用户的动态序位表。

2.1.2 决策

在特高压直流发生严重故障下发切负荷控制指令时,决策模块通过 Kafka 接收到来自调度的控制指令,决策模块会立刻解析控制指令信息,根据指令从决策准备阶段已备好的多组用户动态序位表中选取合适的用户组,再根据控制指令所需要切除的负荷量,从用户动态序位表中从前向后简单的累加可切负荷,就可以快速决策出满足控制指令切负荷的用户清单,时间控制在 100 ms 以内。

决策包括次紧急和常规决策,次紧急决策通过对次紧急控制指令的分析,结合次紧急用户动态序位表,实现次紧急控的快速响应;常规决策通过对常规控制指令的分析,结合地区用户动态序位表或分区用户动态序位表,实现常规控的秒级响应。

2.2 精准控制

目前在负荷控制侧,特高压直流故障的处置以低周自动减载、调度直接操作开断输电线路为主要手段,无法保留用户保安电源,对用户影响较大,控制负荷量大时会产生较大的社会影响。用户负荷管理系统的故障预案基于离线计算和典型方式,与电网实时运行情况可能存在差异,负荷控制方案精细化程度不够,目前控制回路数和采集回路数较少,难以避免负荷过切或欠切。精准化控制通过对用户负荷的分类管理,采用不同时间段的控制策略,根据实际控制时刻用户可切负荷量进行用户控制,最大程度降低了事故的影响面,减少经济损失。

负荷分类管理是通过对用户负荷曲线拟合,根据负荷的特性聚类为早峰(A类型)、腰峰(B类型)、晚峰(C类型)、倒挂(D类型)、连续生产(E类型)5种类型的负荷,利用其在各自类型所属时段控制能力较其他时段更强的特点,在控制能力较强的时段优先选择控制。各时段发生特高压应急处置

事故时,如本时段对应类型用户处置能力不足,按照图4所示顺序进行循环补备。连续生产型无明显特征,只有在4个负荷类型用户全部负荷切除后仍无法满足要求的情况下,再补备E类型用户。

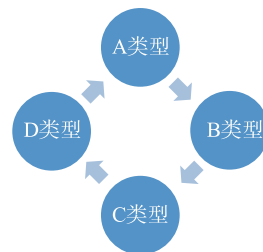


图4 循环补备

Fig.4 Diagram of cycle reserve

在实际指令下发控制过程中,根据下发指令的时段、需要切除的负荷,自动从当前控制能力较强的用户中决策出满足要求的清单,减少控制涉及的用户范围,实现精细化控制。

2.3 稳控保障

在多轮次的控制决策中,可能会有现场装置故障导致的用户在实际控制中未能响应,用户仍然有负荷存在。在第二轮次控制中,此用户存在被再次决策出来的可能,降低了决策用户清单的有效性。为了解决此问题,在决策过程反馈中设计了失效清单的机制,会把由于设备故障导致的无法控制的用户添加入失效清单,在后续多轮次控制中此用户将不再参与,确保了决策清单的有效性。

3 应用场景模拟

在全真模拟环境中,通过全网协调控制模块下发一条地区常规控制指令,下发时刻 2016-08-22 11:15:00,切除南京负荷 170 MW。

指令下发后,任务就放置到了消息总线中,负荷控制决策模块的消息监听程序在接收到控制指令后,从已有的动态序位表中根据用户序位累加用户可切负荷直到满足控制指令切负荷的要求,快速决策出参与本次负荷控制的用户。此时段用户排序规则为 B-C-D-A-E,同负荷类型中可切负荷大的用户靠前。详细用户信息如表 1 所示。

从表 1 可以看到序位表中 1-7 位的用户可切负荷累加后超过了 170 MW,满足控制指令要求,所以本次参与负荷控制的就是以上 7 个用户,用户清单被发送到终端控制模块,执行开关跳闸,用户负荷被切除。负荷切除效果可以从图 5 中看出,在 11:15 分终端下发控制指令后,可切负荷从 260 MW 迅速下降到了 80 MW 左右。

表1 切负荷前用户动态序位

Table 1 User dynamic sequence table before load shedding

用户名称	可切负荷/kW	序位	用户属性
XXXX 公司 1	47 090	1	腰峰型
XXXX 公司 2	37 337	2	腰峰型
XXXX 公司 3	36 676	3	腰峰型
XXXX 公司 4	15 341	4	腰峰型
XXXX 公司 5	13 355	5	腰峰型
XXXX 公司 6	12 822	6	腰峰型
XXXX 公司 7	12 615	7	腰峰型
XXXX 公司 8	12 130	8	腰峰型
XXXX 公司 9	1190	9	晚峰型
XXXX 公司 10	33 585	10	倒挂型
XXXX 公司 11	1874	11	早峰型
XXXX 公司 12	1994	12	补备型

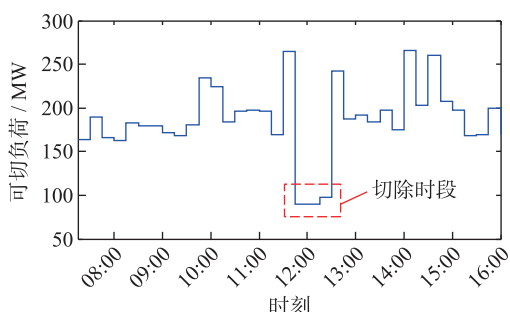


图5 可中断负荷曲线

Fig.5 Interruptible load curve

负荷控制结束后,决策准备层会依据最新的用户可切负荷根据策略规则再次生成用户动态序位表,如表2所示,从中可以看出决策出的7个用户当前可切负荷全部为0。

表2 切负荷后用户动态序位表

Table 2 User dynamic sequence table after load shedding

用户名称	可切负荷/kW	序位	用户属性
XXXX 公司 8	12 230	1	腰峰型
XXXX 公司 1	0	2	腰峰型
XXXX 公司 2	0	3	腰峰型
XXXX 公司 3	0	4	腰峰型
XXXX 公司 4	0	5	腰峰型
XXXX 公司 5	0	6	腰峰型
XXXX 公司 6	0	7	腰峰型
XXXX 公司 7	0	8	腰峰型
XXXX 公司 9	1290	9	晚峰型
XXXX 公司 10	33 584	10	倒挂型
XXXX 公司 11	1974	11	早峰型
XXXX 公司 12	2094	12	补备型

4 结语

本文分析了传统电网故障情况下切负荷的手

段以及面临的问题,提出了基于用户可中断负荷的实时控制决策方案,设计了实时控制决策总体框架,详细介绍了快速响应、精准控制、稳控保障等关键技术的实现原理,模拟了不同负荷切控制指令下决策模块的应用场景。该技术已经在江苏电网大规模源网荷友好互动系统中应用,实现了在特高压直流故障时,对用户可中断负荷的秒级实时精准控制,最大程度上减小停电损失和停电赔偿,也对减小社会影响,提升公司社会形象具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘建坤, 胡亚山, 赵静波, 等. 特高压接入对江苏电网的影响展望[J]. 江苏电机工程, 2010, 29(1): 1-3.
LIU Jiankun, HU Yashan, ZHAO Jingbo, et al. Prospects to the influences of the ultra high voltage grid on Jiangsu power system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(1): 1-3.
- [2] 黄蕾. 江苏: 特高压时代已到来[J]. 国家电网, 2016(1): 108-110.
HUANG Lei. Jiangsu: Era of ultra-high voltage has come[J]. State Grid, 2016(1): 108-110.
- [3] 周勤勇, 刘玉田, 汤涌, 等. 受端电网最大直流受入规模分析方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 770-777.
ZHOU Qinyong, LIU Yutian, TANG Yong, et al. Analysis method for the maximum HVDCs' capacity to receiving-end power grid[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 770-777.
- [4] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 华东大受端电网直流接入能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 147-152.
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability evaluation for East China Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 147-152.
- [5] 朱鑫要, 汪惟源, 汪成根, 等. 江苏特高压交直流输电交互影响研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 39-42.
ZHU Xinyao, WANG Weiyuan, WANG Chenggen, et al. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu Power Grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 39-42.
- [6] 罗建裕, 李海峰, 江叶峰, 等. 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 25-29.
LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology[J].
- [7] 朱建全, 段翩, 刘明波, 等. 计及风险与源-网-荷双层协调的电力实时平衡调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3239-3247.
ZHU Jianquan, DUAN Pian, LIU Mingbo, et al. Electric real-time balance dispatch via bi-level coordination of source-grid-load of power system with risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3239-3247.
- [8] 刘娅琳, 杜红卫, 赵浚婧, 等. 基于源网荷互动模式的智能配电网调度业务优化[J]. 华东电力, 2014, 42(7): 1290-1293.

- LIU Yalin, DU Hongwei, ZHAO Junjing, et al. Smart distribution grid scheduling business optimization based on source network load interaction mode [J]. East China Electric Power, 2014, 42(7): 1290-1293.
- [9] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- [10] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽, 等. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.
- WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli, et al. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [11] 何彦英, 曾鸣. 考虑需求侧响应的配电网运行效应评估研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 1-7, 14.
- HE Yanying, ZENG Ming. Effect evaluation of demand response on distribution network operation [J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11): 1-7, 14.
- [12] 崔传建, 李博, 李思维, 等. 面向电力用户的一种通用互动服务平台设计[J]. 电力系统通信, 2012, 33(9): 30-33.
- CUI Chuanjian, LI Bo, LI Siwei, et al. Design of general interactive service platform for power users [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(9): 30-33.
- [13] 竇健, 董俐君, 朱新山, 等. 结构化用电客户互动需求信息的比对库设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(6): 80-85.
- DOU Jian, DONG Lijun, ZHU Xinshan, et al. Design of the comparative database for structured interactive demand information of electricity customers [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2016, 28(6): 80-85.
- [14] 王军, 武文广, 李逸驰, 等. 支撑互动用电的用电信息采集系统基本构成与关键技术[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 1-5.
- WANG Jun, WU Wenguang, LI Yichi, et al. Basic structure and key technology of power utilization information acquisition system for securitying interactive service [J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 1-5.
- [15] 曾亮, 梁小兵, 欧燕, 等. 基于多目标-约束优化进化算法的能源综合调度[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(11): 2668-2678.
- ZENG Liang, LIANG Xiaobing, OU Yan, et al. Energy integrated scheduling based on multiobjective-constrained optimization evolutionary algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(11): 2668-2678.
- [16] 朱亮, 黄怡, 江全元, 等. 多智能体开发系统 SWARM 在电力系统中的应用[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 550-554.
- ZHU Liang, HUANG Yi, JIANG Quanyuan, et al. Principle and applications of multi-agent developing system swarm in power system [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 550-554.

作者简介:



方超

方超(1985—),男,江苏句容人,工程师,从事电力软件开发与设计工作(E-mail: 13770328566@163.com);

陈楚(1988—),男,江苏徐州人,工程师,从事电力软件应用与设计工作(E-mail: 18602507851@139.com);

熊政(1976—),男,江西南昌人,高级工程师,从事电力软件开发与设计工作(E-mail: 15905166619@139.com);

宋煜(1979—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力软件开发与设计工作(E-mail: 15905166663@139.com)。

Application of Real-time Load Control Decision Technology Based on User's Interruptible Load

FANG Chao¹, CHEN Chu², XIONG Zheng¹, SONG Yu¹

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210036, China)

Abstract: When serious HVDC transmission fault happens, emergency load shedding measures will be taken. In order to achieve the precise load shedding, it proposes a real-time load control decision technology based on user's interruptible load. Some key technologies involved in the process of control decision are studied just like quick response, precise control, stability control security. Designed the mechanism used in the decision such as user dynamic sequence table, decision preparation, load cycle supplement, failure switch list and so on. Finally, the application scene of real-time control decision is simulated. The real-time control decision technology proposed in this paper has been applied in the large scale supply and demand friendly interactive system, and has realized real-time precision control ability to user's interrupt after receiving the load shedding instruction.

Key words: quick response; precise controlling; stability control security

(编辑 刘晓燕)