

基于集散递阶控制框架的低频低压减负荷系统

传统的低频低压减负荷的控制方法，对分散安装在各地的低频低压减负荷装置缺乏协调，不利于实现系统整体控制的实时协调和优化。提出了一种基于集散递阶控制框架的低频低压减负荷系统，介绍了系统的体系结构及功能实现，同时分析了系统的特点。该系统有效解决了传统低频低压减负荷装置的局限性，充分利用了现有智能化变电站及调度数据网络，满足了电网对区域协调及负荷准确切除的要求。

杨才明 金乃正 罗 刚 杨剑峰/绍兴供电公司



杨才明/高级工程师

跨入21世纪以来，为了适应我国经济的快速发展，打破能源分布和经济发展的不平衡，建设集约型社会，中国电力的发展逐渐提速，1 000 kV交流，±800 kV直流特高压已经开展试点并逐步推广，电网建设目标是以特高压为骨干电网，形成全国电网的互联。相应的全系统动态行为更加复杂，极端严重故障下的频率稳定和电压稳定问题更加突出。由低频低压减负荷装置等安全自动装置构成的第三道防线作为电力系统防御体系的最后一道防线，当系统发生频率异常、电压异常等事故时，采取切负荷的控制措施，防止系统崩溃，避免出现大面积停电，为保证系统安全稳定运行发挥了重要作用。

关键词/Keywords

低频减负荷·
低压减负荷·
组织架构·
协调控制·

以江苏为例，江苏电网按照华东电网公司的要求在近年来部署了大量的低频低压减负荷装置。其中低频减负荷装置7 220套，投切容量2 708万kW，低压减负荷装置2 561套，投切容量1 740万kW。这些低频低压减负荷装置形式上有不同的差异，有早期集成在保护装置及综自系统中的低频低压减负荷功能模块，也有近期按

照国家电网低频低压减负荷规范的集中式低频低压减负荷装置。

但是，传统的低频低压减负荷装置基本上是以各变电站为基础的单装置，且仅依赖于就地频率或者电压的下降情况触发装置动作，在装置的动作逻辑中无法涉及远方信息，无法准确把握全系统的动态特性，更难以衡量该变电站的减负荷措施对大范围区域性电网稳定要求所起到的作用；而且减负荷控制策略一旦整定好，便不再随实际工况变化而变化。故而，传统的低频低压减负荷装置不能及时、正确反应系统的动态情形，已很难适应大电网的协调控制的要求。

近年来，随着电力系统内通信技术的迅猛发展及专用数据网络的逐渐普及，研究基于现代通信与网络技术的新型低频低压减负荷装置就显得尤为重要。本文在现行低频低压减负荷装置的基础上，提出了一种扩展方式，可自适应调整切负荷策略，且能够通过接近原则做到对负荷的准确切除，一定程度上满足现有电网对区域协调控制和准确切除负荷的要求。

系统的体系结构

现行的系统一般为三种基本控制方案，分别为分散控制、集中控制和集散递阶控制。

1. 分散控制

分散控制采用现场就地信息，便于控制和观测信号的传输，同时不需要通信的支持，所以具有较高的可靠性。但

是由于分散控制对于大系统的全局状态是不可控制和不可观测的,很难获得全局的最优控制行为。现阶段低频低压减负荷主要以这种模式为主。

2. 集中控制

集中控制能够对系统全局运行状态进行统一的、集中的观测和控制,可采用最优控制理论进行全局优化控制设计,在灵活性、经济性及全局性分析方面都要明显好于分散控制方式。但是如果控制中心的控制系统发生故障或者计算不准确,则会导致整个系统全局的控制瘫痪或有误,故可靠性较低。

3. 集散递阶控制

递阶控制将分散控制与集中控制相结合,既有分散的、直接的且及时的局部控制,又有集中的、间接的且全局的协调控制,兼有分散控制和集中控制的优点。

本文提出的低频低压减负荷系统采用的是集散递阶控制结构,系统包括子站、调度自动化系统及主站系统。

图1为系统控制框图,一方面充分利用了集散递阶控制的优点,极大地简化了通信系统的复杂程度;另一方面,若子站收到主站下发的控制指令,则修改当前减负荷的控制策略,否则仍按照装置内原先设置的控制策略执行,从而不会影响到装置的可靠性,对电力系统的安全稳定运行起到重要作用。

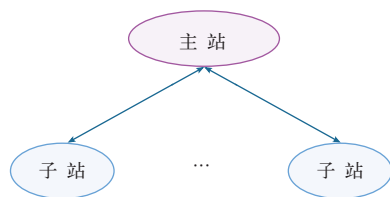


图1 系统控制框图

系统各部分主要功能

1. 子站

子站由安装在各电压等级变电站(220 kV、110 kV和35 kV)内的低频低压减负荷装置组成。装置实时测量站内母线的频率与电压及每条负荷线的电压与电流值,通过处理与计算得出各负荷

线的实时功率大小,后将各母线的频率、电压及每轮负荷的可切量这些实时数据通过调度自动化系统向主站上传;同时接收主站下发的负荷调整控制指令,对装置内的本地策略进行修改与调整。装置流程图如图2所示。

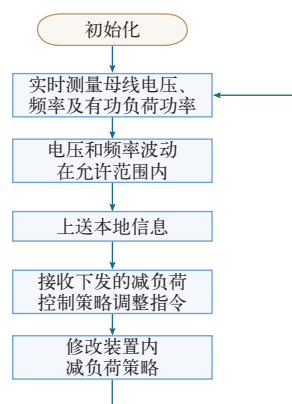


图2 装置流程图

2. 主站系统

主站系统通常安装在控制中心内,由前置机、服务器和 workstation 组成。主要功能为对各子站上送的母线频率、电压及各轮次负荷可切量等信息进行收集、计算和存储等。同时,利用这些加工处理过的信息进行优化建模并求解,并将计算好的控制信息下发给各子站来执行。当然也可通过 workstation 来进行手动操作,对相关信息、模型等进行修改或者调整。主站与子站的联系框图如图3所示。

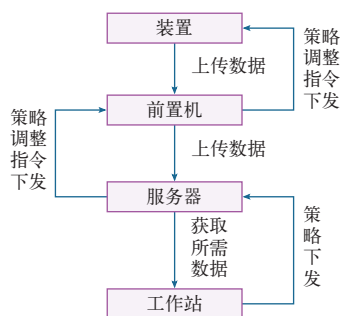


图3 主站与子站的联系框图

3. 调度自动化系统

调度自动化系统主要负责主站与各子站之间的数据通信,同时提供电网实时断面及高级应用分析功能。

协调控制策略

1. 子站

子站的低频低压减负荷装置可对站内母线的频率与电压进行快速反应，一旦频率或者电压超过动作定值，装置将迅速动作，确保了作为电网第三道防线动作的可靠性。另一方面，子站装置可将母线频率与电压及负荷线各轮次可切负荷量等实时信息以秒级为单位向主站上送，使主站能够根据这些实时信息对系统的频率、电压及负荷及时掌握，让实时更新系统模型数据变为可能。装置动作流程如图4所示。

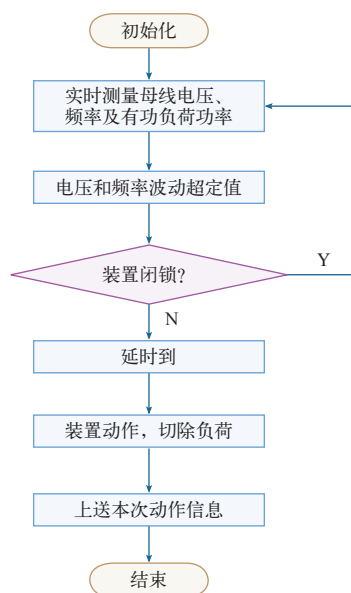


图4 装置动作流程图

2. 主站系统

主要控制系统的控制策略不应该追求在每一点都能使电网达到最优的状态，而是应该抓住影响系统变化的较长时间级、主要的工况变化，这样虽然在经济上会有一定的损失，但是却大大减少了控制策略的制定与下发次数。如果按某一短时间周期频繁从全局角度建立系统的优化控制模型，得到相关的策略并下发执行，这些都要基于短时间周期内大量的系统信息，进而对信息的准确性及信息传输的可靠性都有很高的要求，同时对建模的科学性、合理性及算法的效率性、可靠性也是一个考验，从已有的研究来看，要在电力

系统这样一个庞大的系统内实现，现在还不太可能。所以，本文所述的系统，从主站对信息的收集、切负荷控制策略的制定及下发的时间设定为分钟级。

系统特点

1. 准确切除负荷

主站系统将子站上送的每条负荷线的实时功率按照接近算法根据制定的优先级进行排序，可做到最小过切负荷。

1) 设定优先级共 $N+1$ 级，即从 $0\sim N$ ，优先级为 0 ，则负荷线为重要负荷，不可切除。其余为 $1\sim N$ ，优先级为从高到低，即 1 为最高优先级， N 为最低。

2) 将所有负荷线路的功率值，设定为 $P_1, P_2, \dots, P_m$ (m 为负荷线路的数量)。每一轮次需切负荷量可单独设置，即频率或者电压降落到某一定值，则切除相应功率的负荷线路。以下分两种情况讨论：①所有的负荷线路都处于不同的优先级内，动作时，则根据优先级的顺序从高到低，对负荷进行切除。②同一优先级内有不少于两条负荷线，取极端情况，设所有负荷线都处于同一优先级。则将 m 条负荷线的功率及各种组合的功率和 $[P_1, P_2, \dots, P_m; (P_1+P_2), (P_1+P_3), \dots, (P_{m-1}+P_m); (P_1+P_2+P_3), \dots, (P_{m-2}+P_{m-1}+P_m); (P_1+P_2+\dots, P_m)]$ 与设定的每轮次定值做比较，按接近原则选切功率和最接近定值所对应的线路。

3) 每条负荷线路单独设定轻功率定值，当负荷线路的实时功率小于这个轻功率定值时，这条负荷线将不参与功率比较。

4) 具备加速切负荷功能，当频率或者电压下降较快时，将一次性切除两轮或者三轮负荷，需切功率为各轮需切功率之和（第一轮功率值+第二轮功率值或第一轮功率值+第二轮功率值+第三轮功率值）。

5) 为避免过切，一、二轮加速切除负荷后，若频率、电压继续下降，则直接进入第三轮判断，按第三轮功率定值进行选切。同理，一、二及三轮

加速切除负荷后,若频率、电压继续下降,则直接进入第四轮,按第四轮功率定值进行选切。

6) 为避免断路器拒动的负荷线重新参与下一轮的功率比较,产生再次被选切及欠切现象,已切除的线路将被剔除出后面的功率比较。

7) 若多个轮次先后满足动作条件,则每轮动作所需切除的负荷量均独立,不扣减前一轮次多切的负荷量。

2. 投运方便,适用性高

该系统适应性强,投运方便,在现有的智能化变电站中,只需在控制中心安装主站系统,通过现有的调度数据网和各个安装低频低压减负荷装置的变电站进行数据通信,对已有系统不造成任何影响。

当站内的低频低压减负荷装置动作以后,主站系统将起动分析,并生成控制策略报告,通过这部分信息的对比,有利于分析并验证站内低频低压减负荷装置动作的合理性,同时也能够即时提示调度员装置的动作情况,判断是否执行了相应的动作策略。

3. 安全可靠

当通信线路因为某种原因出现故障时,并不影响子站内的装置及时正确的做出动作。且作为独立系统,子站内的装置具有判断能力。当由于通信传输或者建模求解等出现问题时,下发给子站的切负荷控制策略可能会不合理。因为装置具有的自主性,决定装置不会无条件盲目执行这些指令,而是自主判断这些指令是否超出了本装置的安全运行范围等,如果判断超出,会向主站发出确认指令信息,直至确认指令合理,才会执行,否则只会按照装置内原有的策略进行动作,从而有效地规避了风险。

结束语

传统的低频低压减负荷装置仅反应就地的频率与电压的变化,虽然从可靠性来说有了基本的保证,但是已经越来越难以适应从广域系统层面

对电网的协调与优化。

本文提出的基于集散递阶控制构架的系统,就是对现有的低频低压减负荷装置的一种扩展,把本地电气量与远方信息相结合,解决了传统装置的策略一旦制定就无法随大系统的变化而做调整的问题。在一定程度上推进了电网第三道防线控制技术的发展。

按照本文所提出的对现有传统低频低压减负荷装置的扩展模式,将不仅仅局限于在地方调度中心控制的小区域电网,相信完全可以在更大区域内的系统内实现。

参考文献

- [1] 焦李成. 协同进化计算与多智能体系系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 赵遵廉. 中国电网的发展与展望 [J]. 中国电力, 2004, 37 (1).
- [3] 杨以涵, 张东因, 马赛, 等. 大电网安全防御体系的基础研究 [J]. 电网技术, 2004, 28 (9).
- [4] 董红斌, 王建华. 多Agent技术研究 [J]. 计算机应用研究, 1999, 16 (2).
- [5] DL/T 723—2000 电力系统安全稳定控制技术导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [6] 韩英铎, 闵勇, 洪邵斌. 复杂扩展式电力系统低频减载方案设计 [J]. 电力系统自动化, 1992, 16 (1).
- [7] 刘红进, 袁斌, 戴宏伟, 等. 多代理系统在电力系统中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (19).
- [8] 王俊普, 陈峰, 徐杨, 等. 基于Agent的集散递阶智能控制的研究 [J]. 控制与决策, 2001 (2).
- [9] 陈得宇. 基于MAS的智能电压控制系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [10] 侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 等. 基于多代理技术的低频低压减负荷控制 [J]. 电力系统自动化, 2011 (4).

(收稿日期: 2014-10-20) **EA**