

# 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统

罗建裕, 李海峰, 江叶峰, 罗凯明, 刘林

(国网江苏电力公司调度控制中心, 南京 江苏 210024)

**摘要:**特高压直流严重故障时的紧急切负荷措施是阻止受端电网频率跌落的必要手段。结合稳控和营销负控系统特点, 本文提出了以企业可中断负荷为精准控制对象的负荷控制系统。比较分析了稳控装置负荷控制与营销系统负荷控制方式的优缺点, 介绍了精准负荷控制系统的整体架构, 其中重点阐述了系统各层级功能定位、负荷控制原则和防止系统误动与拒动等关键技术。本文提出的精准负荷控制系统已在江苏电网建成投运, 实现了350万千瓦秒级精准实时控制和100万千瓦毫秒级紧急控制能力。

**关键词:**大受端电网; 可中断负荷; 系统保护; 切负荷控制系统; 稳控装置

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)01-0025-05

特高压交直流电网建设过渡阶段, 安全稳定控制系统依然是紧急情况下保障电网安全的重要手段<sup>[1-4]</sup>。2015年9月19日, 华东电网某馈入特高压直流双极闭锁, 受端电网损失功率4900 MW, 电网频率最低跌至49.56 Hz<sup>[1]</sup>。若发生多回直流同时闭锁等严重故障, 电网频率将产生更严重跌落, 甚至可能导致系统频率崩溃。为确保直流故障后电网稳定安全稳定运行, 通常综合采用多直流提升、抽蓄电站切泵等措施来平衡电网功率的缺额, 但上述措施在直流严重故障下仍不足以阻止电网的频率跌落, 紧急切负荷措施依然是必要手段<sup>[5]</sup>。

针对类似直流双极闭锁等严重故障, 若采用过去以110 kV负荷线路为对象, 集中切负荷方式, 易触发国务院599号令<sup>[6]</sup>所规定的电力事故等级, 造成较大的社会影响。本文提出了基于稳控技术的精准负荷控制系统, 控制对象精准到生产企业内部的可中断负荷, 既满足电网紧急情况下的应急处置, 同时仅涉及经济生活中的企业用户, 且为用户的可中断负荷, 将经济损失、社会影响降至了最低, 是负荷控制系统的一大技术创新。

## 1 现有负荷控制模式与特点

电网负荷控制主要包括调度批量负荷控制和营销负荷控制系统2种控制模式。电网故障情况下, 负荷控制主要通过第二道防线的稳控系统紧急切除负荷, 防止电网稳定破坏; 通过第三道防线的低频低压减载装置负荷减载, 避免电网崩溃; 这种稳控装置集中切负荷社会影响较大, 电网第三道防

线措施意味着用电负荷更大面积损失。

### 1.1 营销负荷控制系统

营销负控系统一般与用电采集系统一体化建设, 用户侧终端可实现用户负荷信息精确采集, 并上送至营销负控主站。主站具备用电信息采集、监测、控制功能, 系统发布功率/电量定值控制指令, 实现对用户负荷的监测和控制<sup>[7]</sup>。对于营销负控系统, 通道网络组织是系统建设的重要环节, 当前主要有2种组网方式。如图1所示, 一是用户负控终端通过230 MHz数传电台等无线公网, 实现信息交互。该方式通信速度慢, 通道可靠性不高。二是负控终端通过用户至就近公网变电站专用光纤通道, 并经加密装置后接入电力数据网交换机, 实现组网。该方式传输速度快, 通道可靠性高, 但企业用户至就近公网变电站必须有光纤通道。营销负控系统明显的优势是: 能够实现稳态情况下负荷精确采集和精准控制, 控制时间在秒级以上。

### 1.2 稳控装置负荷控制系统

对于电网故障下负荷紧急控制, 存在控制容量大、速度快、可靠性要求高等特点。限于通信条件、动作延时、投资预算等因素, 以往稳控装置均采用集中控制方式, 执行端一般设置在220 kV变电站, 以110 kV负荷线路为控制对象, 如图2所示, 无法做到按负荷性质进一步区分与选择。例如西北—华中±500 kV德宝直流联网工程四川侧配套切负荷控制系统、宁夏—山东±660 kV宁东直流输电工程山东侧配套切负荷系统, 均采用此类切负荷方式。该类切负荷稳控系统为确保大电网安全发挥了重大作用, 但社会影响也相对较大。随着电网一次网架的加强、直流功率调控等控制方式的实际应用,

收稿日期: 2016-10-27; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备专项项目(2016YFB0901100)

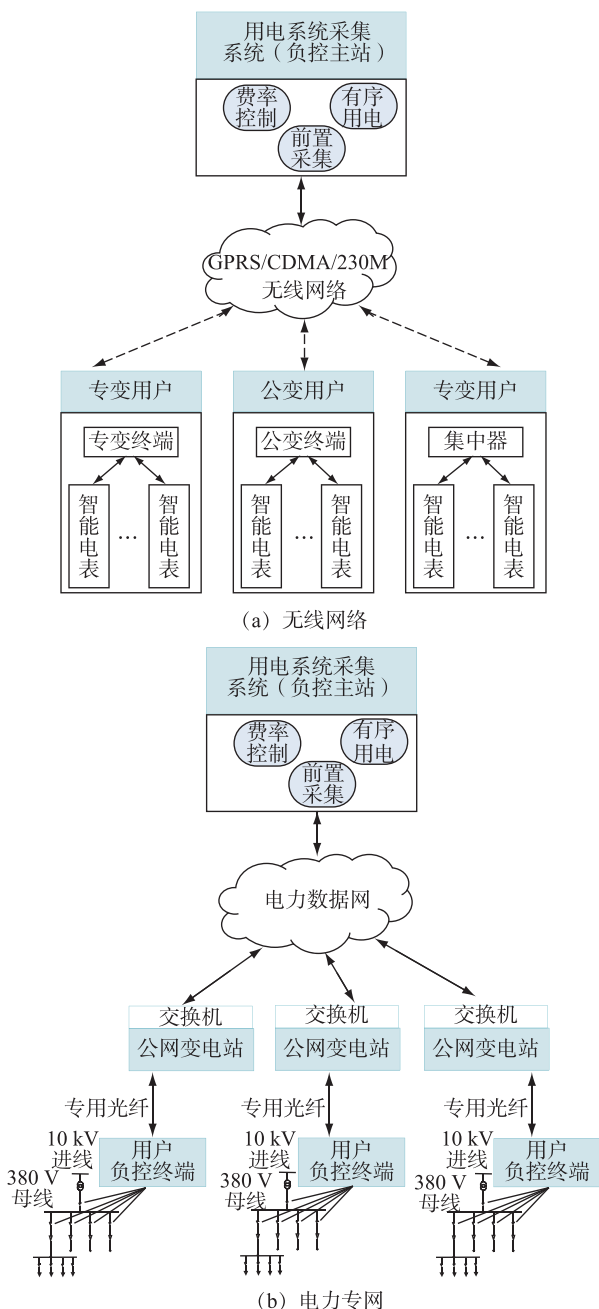


图1 不同组网方式的营销负控系统

除了极为薄弱的电网或具备集中大工业负荷可短时切除的情况外,这种电网相对集中负荷控制手段已较少使用。

稳控装置负控系统明显优势:在电网故障情况下在毫秒级或秒级以内实现负荷控制,确保电网安全稳定运行。

作为高占比直流馈入电网,紧急切负荷仍然是电网故障情况下确保电网安全的必要手段。结合传统稳控装置负荷控制系统实时性、安全性优点,以及传统营销负荷控制系统精确性、可选择性优点,构建一套基于稳控技术的既安全可靠又经济实用的精准负荷控制系统显得非常迫切。

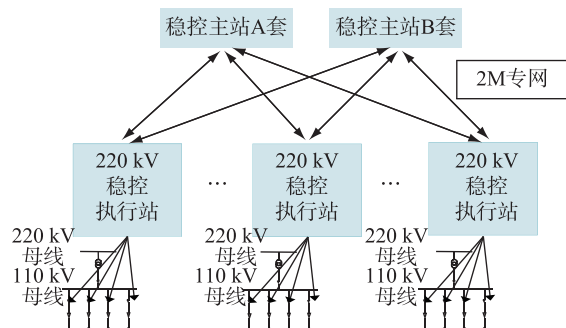


图2 二道防线稳控系统

## 2 精准负荷控制系统整体架构

该系统改变传统稳控装置以 110 kV 线路为对象集中负荷控制方式,以 35 kV, 10 kV 生产企业为最小节点,以企业内部短时间可中断的 380 V 负荷分支回路为具体控制对象,在电网故障紧急情况下既实现快速的批量负荷控制,确保大电网的稳定,同时又实现了负荷的精准、友好控制,将电力用户的损失降至最小。

控制系统架构如图 3 所示。负荷控制精细化决定了涉及企业用户数量多;解决严重故障导致的电网大功率缺额问题,决定了控制系统覆盖地域广。因此,基于稳控技术的负荷精准控制系统按照负荷控制中心站、控制子站、用户就近变电站以及企业用户站 4 层控制架构设计。中心站、子站按双套配置,用户站与就近变电站单套配置。控制中心站与子站均设置在 500 kV 变电站,中心站考虑接入 10 个子站,各控制子站接入 200 个用户站。用户就近变电站在控制系统中起到电力公网与企业用户通道跨接桥梁作用,数量决定于用户的地理分布情况,一般呈 1:4 比例。

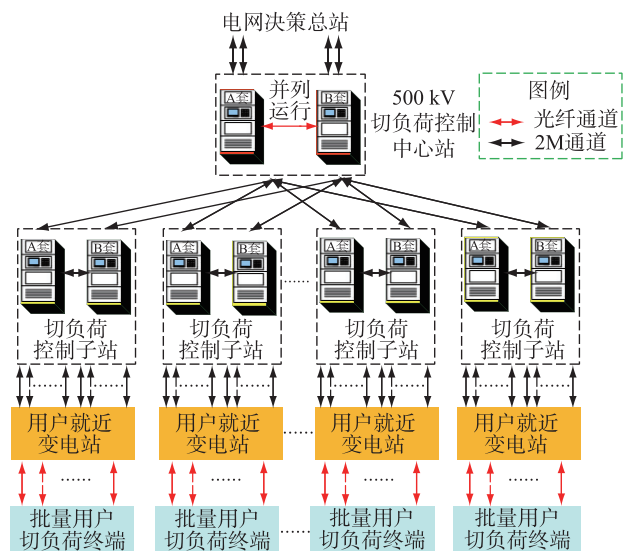


图3 系统整体架构

整套系统实现地区企业用户可中断负荷量实时汇总,紧急情况下完成地区可中断负荷的精准控制<sup>[8]</sup>。从电网故障发生到负荷切除,整组时间控制在450 ms以内。

### 2.1 控制系统通道组织

各公网变电站装置间均采用2 M保护专用通道。包括控制中心站与控制子站、控制子站与用户就近变电站等站间通道、以及控制中心站与上一级决策总站。

各生产企业未标配SDH通信设备,负控终端无法通过2 M通道直接接入公网通信网络。充分利用企业与就近公网变电站的专用光纤通道,负控终端数据经光缆传输,再经变电站侧光/电信号转换,通过同轴电缆接入变电站SDH设备。如图4所示,负控终端实现与控制系统组网。

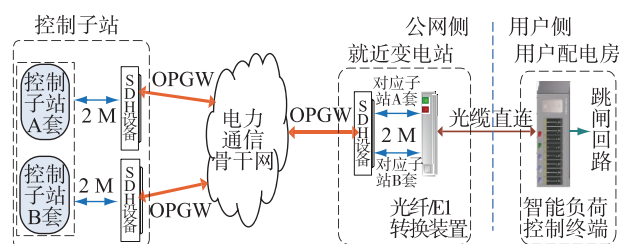


图4 系统通道组织结构

### 2.2 负荷控制中心站

控制系统各层次逻辑关系如图5所示。负荷控制中心站设置在500 kV变电站,装置采集两段500 kV母线电压,计算电网频率。通过与子站通信,汇集地区企业用户可中断负荷总量(即可控制量),再上送电网决策总站;接收电网决策总站切负荷容量命令,结合一定防误判据(例如就地低频),向各子站发送切除负荷层级命令。控制系统兼具第三道防线低频减载功能,中心站判断电网频率低至动作门槛,实时向子站下发低频决策结果,子站再结合就地频率,采取措施。

### 2.3 负荷控制子站

控制系统M个负荷控制子站根据用户的密级程度设置在同一地市或不同地市,一个子站接入200户企业站。各子站装置采集两段500 kV母线电压,计算电网频率。将本站所辖用户根据优先级原则,分为N个层级,并将各层级对应用户的可中断负荷总量上送至控制中心站;接收中心站切负荷层级指令,并结合本站防误判据,向层级对应企业用户发送切除负荷指令。与控制中心站相同,装置兼具第三道防线功能:实时判别电网频率,电网频率低至门槛,与中心站低频决策结果进行校核,实现负荷的控制。

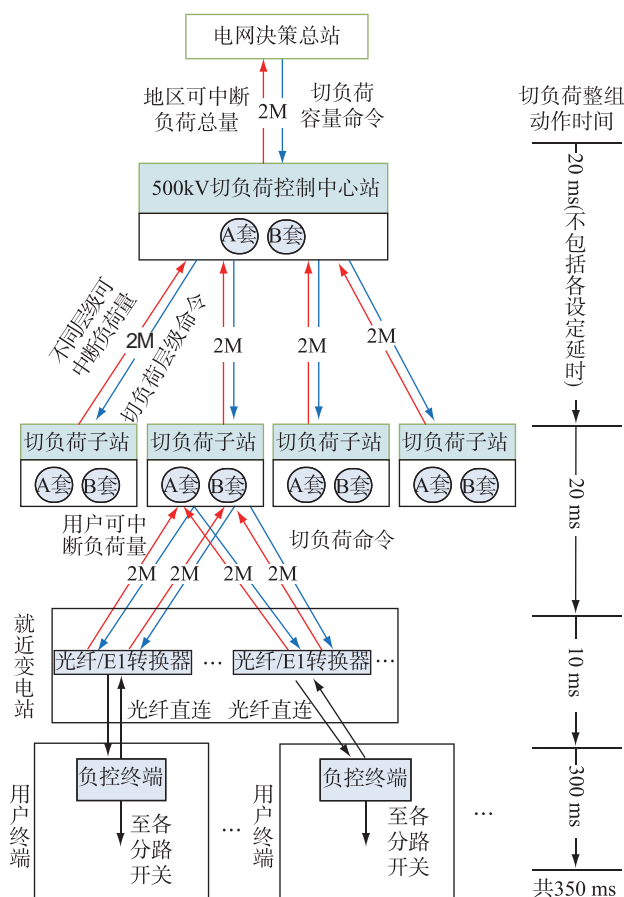


图5 系统各层次逻辑关系

该套系统不仅实现了二道防线的精准负荷控制,同时较传统三道防线离散配置的低频减载装置,也实现了负荷精准控制。

### 2.4 智能负控终端

智能负控终端可实现紧急控制功能(毫秒级)与稳态控制功能的有机结合(秒级、分钟级)。负控终端实时采集用户所有380 V分支回路功率。针对毫秒级负荷控制需求,由客户自主选择一部分非核心、可短时中断的用电负荷,如启停方便的生产线和空调用电、部分照明用电等可中断负荷,参与电网故障情况下的紧急负荷控制。智能负控终端经专用光纤以及变电站侧2 M通道,实现该用户可中断负荷量上送控制子站,并接收控制子站切除可中断负荷指令。

### 2.5 负荷控制原则

控制系统按四层架构设计,用户负控终端将可中断负荷总量上送控制子站。如表1所示。M个控制子站根据本分区用户优先级的不同,将用户分为N个层级,并将每个层级用户可切负荷总量 $P_{mn}$ 上送控制中心站<sup>[9]</sup>。控制中心站将地区负荷总可切量P并上送决策总站。

表1 中心站与子站负荷统计图

控制子站	第1层	第2层	...	第N-1层	第N层
站1	$P_{11}$	$P_{12}$	...	$P_{1(N-1)}$	$P_{1N}$
站2	$P_{21}$	$P_{22}$	...	$P_{2(N-1)}$	$P_{2N}$
站M-1	$P_{(M-1)1}$	$P_{(M-1)2}$	...	$P_{(M-1)(N-1)}$	$P_{1N}$
站M	$P_{M1}$	$P_{M2}$	...	$P_{M(N-1)}$	$P_{MN}$
中心站	$P_1$	$P_2$	...	$P_{(N-1)}$	$P_N$

中心站:

$$P_n = \sum_{i=1}^M P_{in} (n \leq N) \quad P_0 = 0 \quad (1)$$

上送决策总站:

$$P = \sum_{i=1}^N P_i; \quad (2)$$

紧急情况下,中心站接收决策总站切负荷容量指令  $P_{cut}$ ,根据最小过切原则,决策各子站需切除层级:

$$\sum_{i=1}^{n-1} P_i < P_{cut} \leq \sum_{i=1}^n P_i \quad (1 \leq n \leq N) \quad (3)$$

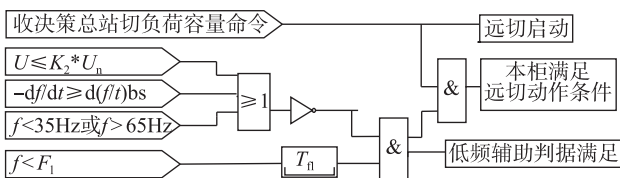
中心站向所有子站发送切除第1至第n层级负荷命令。

### 3 控制系统可靠性措施

负荷控制系统不正确行为不仅给电网安全带来严重后果,甚至会产生难以估量的社会负面影响。因此,系统从硬件接口到软件逻辑,装置防误动与防拒动均为重要的考虑因素。

#### 3.1 考虑就地频率作为远方命令辅助判据

控制中心站接收电网决策总站切负荷命令,以及控制子站接收中心站命令,均须结合本地频率辅助判据确认指令的正确性。以控制中心站为例,收到决策总站切负荷指令后,结合本地频率确认,满足就地频率门槛与变化率要求,本装置方认为决策总站切负荷指令有效,逻辑关系如图6所示。



$K_2$ 为电压消失比例系;  
 $d(f)/dt$ 为接收决策总站切负荷命令低频滑差闭锁值;  
 $F_1$ 为接收决策总站切负荷命令低频确认频率;  
 $T_n$ 为接收决策总站切负荷命令低频确认延时

图6 中心站确认总站切负荷指令逻辑

子站收到中心站低频减载轮次指令,需结合本地低频判断,满足本地低频动作校核,子站才认可中心站低频减载命令有效。结合双柜配合防误原则,向用户负控终端下发切负荷命令,逻辑关系如图7所示。

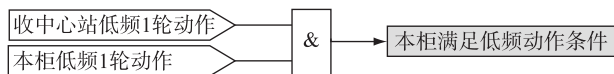


图7 确认中心站低频减载指令逻辑

#### 3.2 双套系统采用“二取二”决策原则

如图8所示,控制中心站、控制子站装置均为双套配置,柜间采用数据交换模式<sup>[10]</sup>,每套装置配置有“另柜检修压板”。正常运行时,中心站、子站4套装置柜间“另柜检修压板”均退出,此时中心站与子站均处于“二取二”原则:以中心站为例,收到决策总站切负荷命令,或装置就地低频逻辑达到动作门槛,通过柜间信息交换,须双套装置均判出相同性质的决策结果,双套装置方可向子站发送指令。若一套装置异常,本站另一套装置须投入“另柜检修压板”,系统切换至“二取一”原则<sup>[11]</sup>。

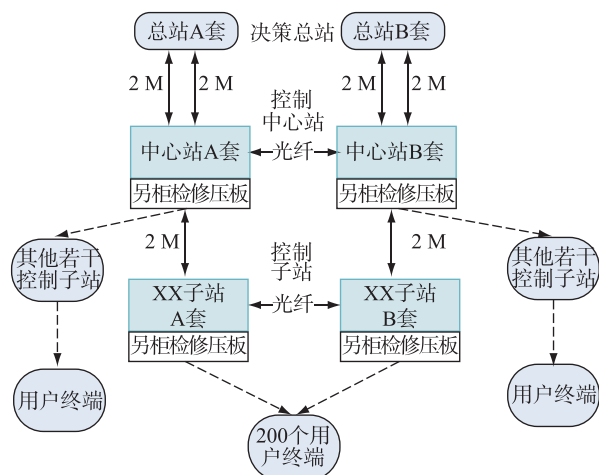


图8 柜间信息交换关系

以图8中控制中心站、XX子站为例:

(1) 中心站A套退出。中心站B套自动闭锁,切负荷控制系统退出运行。投入B套“另柜检修压板”,B套切换至“二取一”模式,并将“二取一”模式下达至各子站。控制系统自动切换至B套独立运行模式;

(2) XX子站A套退出。该子站B套自动闭锁,XX子站负荷分区退出,控制系统处于中心站与其余控制子站局部运行状态,系统仍为“二取二”模式。投入XX子站B套“另柜检修压板”,B套装置解除闭锁,控制系统恢复为中心站与所有子站运行状态,系统依旧“二取二”模式。中心站A套装置从B套装置获取XX子站负荷信息,确保了中心站双套装置决策依据一致。

(3) 中心站/子站一套装置退出的因素包括:与总站(或中心站)通道异常、装置总功能压板退出、装置硬件异常等情况。

### 3.3 中心站与决策总站双通道切换备份

控制中心站与控制子站控制逻辑采用“二取二”原则,中心站一套装置退出,另一套在“另柜检修压板”未投入的过渡阶段,装置亦闭锁,切负荷控制系统将处于退出状态,电网的安全性下降。对于中心站装置退出情况,与决策总站通道异常是主要因素之一。为了提高可靠性,中心站与心站与决策总站单套装置间采用双通道互为切换设计方案,任一通道异常,另一通道还可确保两站间数据正常交互,从而降低了中心站双套装置退出的概率。

## 4 结束语

基于稳控技术的精准负荷控制系统的已在江苏电网建成投运,实现了3500 MW秒级可中断负荷精准实时控制能力和苏州地区1000 MW毫秒级(系统保护级)紧急控制能力。该系统既满足传统稳控系统快速性、安全性要求,又实现了企业用户可中断负荷的精准控制,为大受端电网解决故障情况下电网频率问题提供了良好解决方案,提高了紧急控制的精细化水平,改善了安全稳定控制效果,最大限度地减少对用户停电的干扰,提升了网-荷友好互动性,为其他省级电网提供了应用示范典型案例。

基于稳控技术的精准负荷控制技术也可为大送端电网精准机组控制,特别是大规模的新能源发电控制提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4):985-991.
- [2] 王晶, 梁志峰, 江木, 等. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4):141-146.

- [3] 程道卫, 刘天琪, 张金, 等. 多落点直流输电系统换相失败影响因素的仿真分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11):59-64.
- [4] 方勇杰. 跨区互联电网紧急控制技术未来发展分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15):1-5.
- [5] 汤涌, 郭强, 周勤勇, 等. 特高压同步电网安全性论证[J]. 电网技术 2016, 40(1):97-104.
- [6] 中华人民共和国国务院. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[Z]. [2011-07-15].
- [7] 刘燕, 姜彤, 李美燕, 等. 鞍山10 kV配电网管理系统的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7):74-76, 80.
- [8] 李德胜, 罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14):151-157.
- [9] 李惠军, 汤奕, 李雪明, 等. 电源送出安全稳定控制系统典型方案及装置主辅运设置原则分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4):74-76.
- [10] 庄伟, 李德胜, 于钊, 等. 应对多直流同时换相失败的安全稳定控制系统[J]. 电网技术, 2016, 40(11):3420-3426.
- [11] 李碧君, 侯玉强. 紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11):104-110.

#### 作者简介:



罗建裕

罗建裕(1961—),男,江苏无锡人,研究员级高级工程师,从事电网调控运行管理方面的工作;

李海峰(1973—),男,河北怀安人,工学博士,研究员级高级工程师,从事电网调控运行管理方面的工作;

江叶峰(1976—),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事电网调控运行管理方面的工作;

罗凯明(1978—),男,贵州惠水人,高级工程师,从事电网调控运行管理方面的工作;

刘林(1985—),男,江苏泰州人,工学博士,工程师,从事电网运行稳定管理方面的工作。

## Source Network Load Friendly Interactive and Precise Load Control System based on Stability Control Technology

LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, LUO Kaiming, LIU Lin

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Dispatch and Control Center, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Emergency load shedding when serious HVDC transmission fault happens are necessary measures to prevent frequency drop of receiving-side power network. Combined with the characteristics of the stability control and marketing load control, it proposes a load control system using the load which can be interrupted as the object of precise control. It compares advantages and disadvantages of the load control by stability control device and load control by the marketing system and then introduces the overall architecture of precise load control system. It focus on the functional position of the system, load control principle and prevention for system malfunction and rejection. The precise load control system proposed in this paper has been completed and put into operation in Jiangsu Power Grid, which realizes accurate control of 3.5 million kilowatt per second and emergency control capability of 1 million kilowatt per millisecond.

**Key words:** large receiving power network; interruptible load; system protection; load shedding control system; stability control device; prevention for system malfunction and rejection