# 基于IEC 61850的水电厂厂用电系统智能负荷控制方案

**指出了当前大中型水电厂厂用电系统普遍存在的自投引发过负荷问题。针对该问题，分析了传统解决方案的缺点及局限性，提出了智能负荷控制方案。该方案依托IEC 61850过程层GOOSE及SMV技术，构建安全可靠的过程层数据网络，实现厂用电系统的全面信息交互。以负荷转移、负荷预切等前瞻性策略为主导，负荷补切策略为后备，融合传统自投方案，根据厂用电系统实时运行状态，生成应激式的工作逻辑，有效解决过负荷问题，并将停电范围尽可能缩小。**

张灵凌　侯　炜　石　勇　严　伟/南京南瑞继保电气有限公司
邹　颖/中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院

张灵凌/工程师

*关键词/Keywords*
*水电厂·*
*厂用电系统·*
*智能负荷控制·*
*IEC 61850·*

## 0　引言

自20世纪90年代以来，我国水电建设不断迈上新台阶，大型水电机组的数量日益增多，水电装机容量在发电行业中的比重大幅上升。

厂用电系统在水电厂安全、经济生产中占据着不可替代的地位。当前，大中型水电厂厂用电系统普遍存在以下问题：水电厂厂用电系统通常采用备自投来保障供电持续，当某段6/10 kV失压时，对应的备自投动作，作为自投目标的母线需要同时承担两段母线负荷，如果是多级备自投，则需要承担多段母线负荷，其进线变压器往往面临过负荷问题，容易引起设备损坏或者跳闸，导致大范围停电，影响生产，造成重大经济损失。基于传统硬接线技术的备自投方案及负荷控制策略很难解决这一问题。

近年来，IEC 61850数字化技术在电力行业内应用广泛，国内数字化变电站数量已颇具规模，在火电厂的应用也有不少工程实例。针对水电厂的标准已经确立（IEC 61850－7－410《水电厂监控通信标准》、IEC 61850－7－510《水电厂建模思想与导则标准》）。采用基于IEC 61850标准的过程层GOOSE及SMV技术，实现装置间模拟量及开关量的全面交互，构建面向整个厂用电系统的智能负荷控制方案，可以有效解决传统备自投动作引发的厂用变压器过负荷问题，全面提高厂用电系统的供电可靠性，保障全厂安全经济运行。

## 1　传统备自投方案及负荷控制策略局限性

传统备自投方案及负荷控制策略无法解决自投引发的过负荷问题，根源在于传统备自投方案及负荷控制策略本身的局限性：

1）传统备自投方案的执行单元，即备自投装置，其功能仅为执行预设的自投逻辑，对自投完成后的过负荷情况不具备预见性，也无法提供应对措施。

2）传统的负荷控制策略，通常在自投完成后发生过负荷时，进行机械式切负荷操作，属于滞后措施；单纯的切负荷操作，切除范围完全视过负荷程度而定，易造成部分设备不必要的停电。

3）传统方案及策略中，各单元独立性及离散型较强，相互之间信息交互少，无法全局掌握厂用电系统的负荷状态。

解决过负荷问题，需要从根本上摒弃以上局限性因素，采用涵盖整个厂用电系统的信息交互方式，建立厂用电系统各装置间的互操作，重新定义厂用电



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

系统自投及负荷控制策略。

## 2　智能负荷控制方案

智能负荷控制方案立足于IEC 61850过程层GOOSE及SMV技术，实现厂用电系统内模拟量及开关量数据全面交互，将备自投与负荷控制融合，实时制定负荷控制策略，规避自投引发的过负荷问题。

### 2.1　方案配置及信息交互

智能负荷控制方案采用主从式架构，由负荷控制主机、高压从机及低压从机三部分组成，数据传输依托于光纤交换机组成的过程层网络。高、低压从机即为高、低压备自投装置，同时也是智能负荷控制方案中的策略执行单元。

负荷控制方案配置示意如图1所示。负荷控制主机实时接收高、低压从机发送的开关量GOOSE信号及表征各厂用变压器负荷状态的模拟量SMV信号，计算并判断备自投动作是否会引发过负荷；依据判断结果及各厂用变压器的负荷状态确定控制策略，由高、低压从机执行；高压从机负责将所辖母线的厂用变压器负荷状态及开关量数据实时上送给主机，并根据主机下发的命令执行备投逻辑及其他负荷控制操作；低压从机实时上送对应0.4 kV的进线开关状态至主机，并根据主机下发的命令执行负荷控制操作。

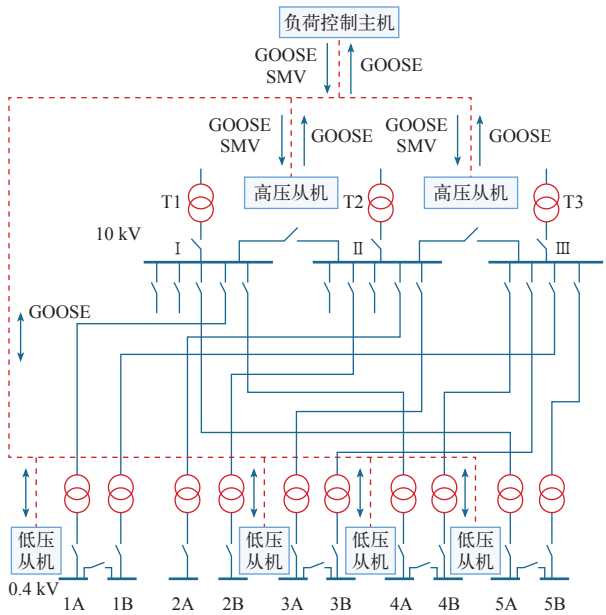


图1　负荷控制方案配置示意

主、从机之间的信息交互如表1所示。

表1　信息交互

| | 主机 | 高压从机 | 低压从机 |
|---|---|---|---|
| 发送模拟量 | | 高压厂用变压器负荷状态 | |
| 接收模拟量 | 高压厂用变压器负荷状态 | | |
| 发送开关量 | 允许备投指令<br>负荷转移指令<br>切负荷指令 | 高压分段开关位置<br>高压从机起动信号<br>高压厂用变压器过负荷信号 | 低压进线开关位置 |
| 接收开关量 | 高压分段开关位置<br>高压从机起动信号<br>高压厂用变压器过负荷信号<br>低压进线开关位置 | 允许备投指令<br>负荷转移指令 | 切负荷指令 |

### 2.2　负荷控制策略

作为智能负荷控制方案的数据支撑，负荷控制主机需要预先设定各6/10 kV厂用变压器的负荷承受上限、6/10 kV各出线之间的拓扑关系、0.4 kV负荷的重要程度分级；另外，需实时计算各6/10 kV厂用变压器的负荷裕度，实时接收高、低压从机实时上送的负荷状态及开关量信息。负荷状态需要进行一定时间段历史存储，以便获取母线的失电压前负荷状态。结合以上所有动态及静态的信息，生成应激的负荷控制策略。负荷控制逻辑主要包含五个部分：负荷转移、自投目标选择、负荷预切、自投执行及负荷补切。

#### 2.2.1　负荷转移

负荷转移策略的生成前提是，主机通过预设



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参数及实时数据分析判定，6/10 kV失电压母线相邻母线容量不足，无法兼顾承担失电压母线；若相邻母线容量足够，则不需要负荷转移。负荷转移策略需要考虑6/10 kV馈线拓扑关系，以及除失电压母线外，其他各母线厂用变压器的负荷裕度。

6/10 kV母线各馈线，实际上可以理解为0.4 kV母线的电源进线。对于0.4 kV母线而言，如果是单电源供电，如图1中0.4 kV母线2A段或2B段的情况，则其对应的6/10 kV馈线与其他馈线不存在拓扑关系，负荷不可转移；若0.4 kV为母线分段形式，如图1中0.4 kV母线1A段和1B段的情况，那么其分别对应的两条6/10 kV馈线之间存在拓扑关系，其中1A段对应I母线，1B段对应Ⅲ母线，1A段负荷可由1B段兼顾，对于I母线来说，给1A段供电的馈线负荷可转移至Ⅲ母线。同理，6/10 kV I母线其他具备拓扑关系的馈线可按照同样的机制进行负荷转移。负荷转移整体策略如下：

1）主机根据失电压母线下所有馈线的拓扑关系，分别确定可向其他母线转移的负荷大小，此步骤需以其他母线的负荷裕度为基准。例如，图1中10 kV I母线失电压后根据拓扑关系的指向，有两条馈线的负荷需要转移至Ⅲ母线，若此时Ⅲ母线负荷裕度不足，那么优先考虑转移负荷重的馈线。

2）主机逐条馈线确认可转移负荷，按照对应馈线拓扑关系，将负荷转移至其他母线。

#### 2.2.2 自投目标选择

通常情况下，水电厂厂用电系统6/10 kV设有多段母线，接线方式主要分为“串联”和“环形”两种：

1）对于“串联”方式而言，位于两端的母线只有一侧存在相邻母线，一旦失电压后，自投目标只能选择唯一的相邻母线；位于中间段的母线，其两侧均存在相邻母线，一旦失电后，有两个可选自投目标，应选择厂用变压器负荷裕度大的母线作为自投目标。

2）“环形”方式下，任何一段母线均存在两侧相邻母线，自投目标选择同“串联”方式下中间段母线。

因此，自投目标选择仅在自投目标不唯一的情况下进行。

#### 2.2.3 负荷预切

负荷预切策略的生成前提是，执行负荷转移策略后，主机预判目标母线仍会过负荷。负荷预切首先需要根据0.4 kV各母线进线及分段断路器的分合状态，确定自投后目标母线需要承担的所有负荷，与目标母线当前负荷裕度比较，若裕度不足，则根据0.4 kV负荷的重要程度分级，切除最低级别负荷。

#### 2.2.4 自投执行

负荷控制方案中的自投逻辑，与常规备自投的逻辑大体一致，但自投逻辑不再以离散的形式独立执行，而是作为整个方案的一部分，经主机下发允许命令后执行。

需要说明的是，自投动作引发过负荷的情况通常发生在6/10 kV，0.4 kV备自投动作一般不会发生过负荷，故本方案不予考虑。

#### 2.2.5 负荷补切

智能负荷控制方案解决过负荷的重点策略为在负荷转移及负荷预切，负荷补切通常只作为后备策略。如果自投执行完成后，目标母线的厂用变压器仍然存在过负荷问题，那么依据对应6/10 kV母线下辖的0.4 kV负荷的重要程度分级，从次要负荷开始切除。

### 2.3 智能负荷控制方案工作逻辑

上述的自投目标选择、负荷转移、负荷预切、自投执行及负荷补切五项策略，经过智能负荷控制主机根据实际情况运算后，剔除或跳过不必要的策略，剩余部分即为智能负荷控制方案的工作逻辑，如图2所示。

## 3 智能负荷控制方案优势

智能负荷控制方案可以最大程度地规避自投引发的过负荷问题，同传统的自投方案及负荷控制相比，主要有以下优势：



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

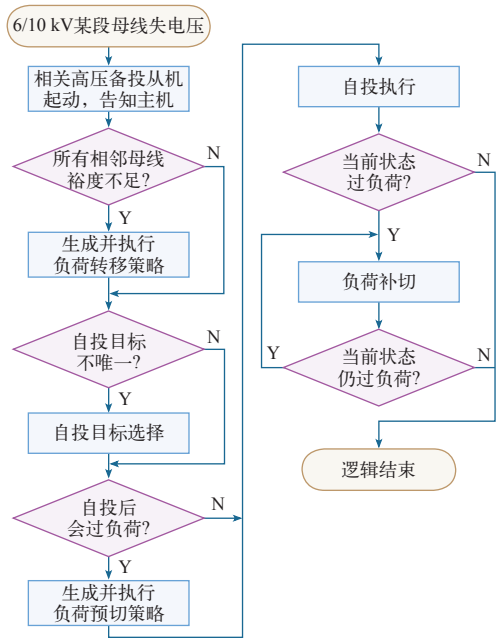


图2　负荷控制方案工作逻辑

1）智能负荷控制方案的负荷控制策略具有前瞻性，负荷转移、负荷预切策略均在自投执行前由主机预判生成并执行。实际自投后，通常不会再出现过负荷现象，同机械式切负荷的滞后措施相比，安全性更高，规避过负荷效果更为显著。

2）智能负荷控制方案中的后备策略负荷补切，实际操作与传统方案中的切负荷类似。但是，实际的切除范围却已大幅缩小，而且通常情况下，不需要执行补切，避免造成不必要的负荷切除及设备停电。

3）信息交互采用IEC 61850标准的过程层GOOSE及SMV技术，信息传递通过光纤网络。同传统的硬接线方式相比，快速、可靠、节约投资且维护方便。

## 4　工程应用分析

以西南地区某水电厂为例，其6 kV共6段母线，接线方式、各厂用变压器容量、馈线额定负荷以及智能负荷控制方案的设备配置如图3所示。实际应用时，负荷状态的表征量为实时电流，此处为了便于分析，采用容量表示负荷状态，且假设所有负荷均运行在额定状态。

图3中，0.4 kV分段形式的母线，其进线变压器容量的设计均会考虑两段母线的总负荷，故其对应的10 kV线路额定负荷可按容量的一半考虑。检修负荷不计，10 kV母线的负荷状态如表2所示。

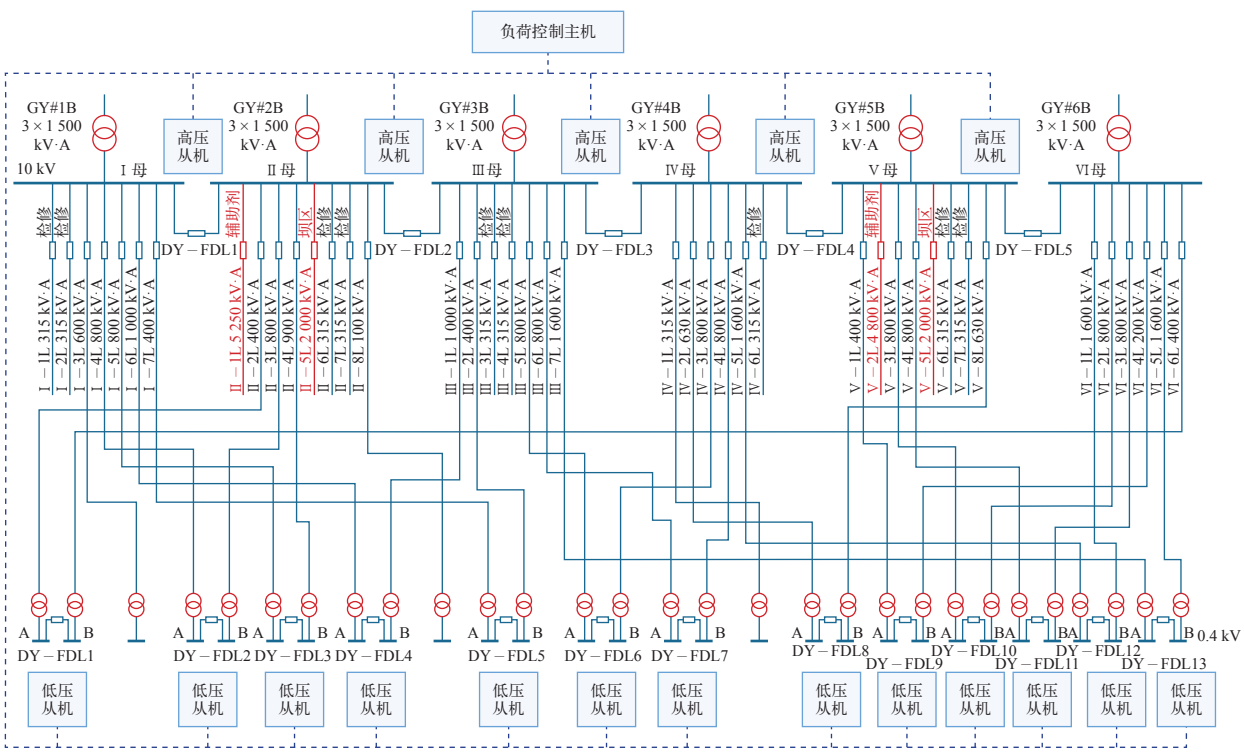


图3　实际工程配置



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 10 kV负荷状态

| 母线 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 负荷/kV·A | 2 000 | 4 725 | 2 300 | 2 230 | 4 715 | 2 800 |
| 裕度 | 2 500 | 4 725 | 2 200 | 2 270 | 4 735 | 1 700 |

通过图3中所示的接线方式，以及表2中所示的负荷状态可知各母线失电压后的情况：

1）Ⅰ母线、Ⅲ母线、Ⅳ母线和Ⅵ母线失电压后，均可选裕度足够的相邻母线作为目标直接自投。

2）Ⅱ母线、Ⅴ母线失电压后其相邻母线裕度均不够，需要生成并执行负荷转移策略。

以Ⅱ母线失电压为例，根据图3可知Ⅱ母线馈线与其他母线馈线间的拓扑关系，由此得出各10 kV母线间可转移负荷情况，如表3所示。

表3 10 kV可转移负荷

（单位：kV·A）

| 负荷来源母线 | 转移目标母线 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
| Ⅰ | | 800 | 700 | | | |
| Ⅱ | 800 | | | | 3 625 | 200 |
| Ⅲ | 700 | | | 800 | | 800 |
| Ⅳ | | | 800 | | 315 | 800 |
| Ⅴ | | 3 400 | | 315 | | 800 |
| Ⅵ | | 200 | 800 | 800 | 800 | |

由表3可知，10 kV母线间可转移负荷呈对称关系，其中Ⅱ母线馈线Ⅱ－1L、Ⅴ母线馈线Ⅴ－2L特殊设计，不影响本方案逻辑。根据表2中信息，Ⅱ母线失电压，其相邻母线Ⅰ母线、Ⅲ母线负荷裕度均不足，执行负荷转移策略，由表3及图4中信息可知，Ⅱ母可转移负荷如下：

1）Ⅱ－3L、Ⅱ－4L负荷可转移至Ⅰ母线，共800 kV·A。

2）Ⅱ－1L、Ⅱ－5L负荷可转移至Ⅴ母线，共3 625 kV·A。

3）Ⅱ－2L、负荷可转移至Ⅵ母线，共200 kV·A。

Ⅱ母线失电压后至自投成功前，这一时间段内实时电流为零，计算时需要主机调用失电压前历史记录，取Ⅱ母线失电压前负荷参与计算。负荷转移后重新计算各母线负荷状态如表4所示。

表4 转移后负荷状态

| 母线 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 负荷/kV·A | 2 800 | 100 | 2 300 | 2 230 | 8 340 | 3 000 |
| 裕度 | 1 700 | | 2 200 | 2 270 | 1 110 | 1 500 |

由表4可知，执行负荷转移策略后，Ⅱ母线仅剩100 kV·A的负荷需要相邻母线承担，此时选择裕度较大的Ⅲ母线作为自投目标。Ⅲ母线裕度足够，无须负荷预切，直接执行自投，自投后各母线负荷状态如表5所示。至此，Ⅱ母线失电压情况下，智能负荷控制方案的所有应激策略及工作逻辑执行完成。

表5 自投后负荷状态

| 母线 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 负荷/kV·A | 2 800 | | 2 400 | 2 230 | 8 340 | 3 000 |
| 裕度 | 1 700 | | 2 100 | 2 270 | 1 110 | 1 500 |

传统方案下，Ⅱ母线失电压直接自投，Ⅰ母线、Ⅲ母线负荷裕度均不足，无论投向哪条母线，过负荷程度都较为严重。若投向Ⅰ母线，则需要切除2 225 kV·A的负荷；若投向Ⅲ母线，需切除2 525 kV·A的负荷，切负荷数量过多，停电范围较大。采用智能负荷控制方案，Ⅱ母线失电压后经负荷转移后执行自投，无过负荷现象，无须切负荷，零停电范围。本实例可证实，智能负荷控制方案能有效解决自投引发的过负荷问题，最大程度上缩小停电范围。

## 5 结束语

本文提出的智能负荷控制方案，采用GOOSE及SMV技术，规避了传统方案在信息交互方面的缺陷；负荷转移及负荷预切策略先于自投逻辑执行，消除了滞后性；辅以负荷补切策略，增强了方案的整体可靠性。整体工作逻辑动态生成，实时性及有效性强。工程案例验证了智能负荷控制方案在解决过负荷问题及缩小停电范围方面较传统方案的优越性。

（收稿日期：2015－02－27）EA



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net