

DOI: 10. 3969 / j. issn. 1009-9492. 2017. 06. 036

# 小水电站群孤网运行电压控制方法研究

李桂昌<sup>1</sup>, 张俊潇<sup>2</sup>

(1. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东广州 510670; 2. 广东电网发展研究院有限责任公司, 广东广州 510080)

**摘要:** 小水电具有分散开发、就地成网、就地供电和发电成本低的特点, 然而部分小水电区域电网与主网联系薄弱, 在丰水期时由于雷电或过电压等原因容易形成孤网。孤网运行时由于存在系统功率不平衡以及电源调节能力不足等特点, 可能导致孤网电压失稳, 从而影响孤网系统的安全性和可靠性。因此, 针对小水电站群孤网运行的情况, 借助小水电机组、D-STATCOM 和储能等设备以研究小水电站群孤网的电压控制方法。研究结果可为孤网运行的电压控制提供技术指导。

**关键词:** 小水电站群; 孤网运行; 电压控制方法; 储能; D-STATCOM

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1009-9492(2017)06-0120-04

## Research on Voltage Control Strategy of Isolated Operation in Small Hydropower Stations

LI Gui-chang<sup>1</sup>, ZHANG Jun-xiao<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Power Electrical Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China; 2. Guangdong Power Grid Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Small hydropower has the characteristics of distributed development, on-site network, local power supply and low power generation cost. However, some small hydropower regional power grids are weakly connected with the main network. In the wet period, the small-scale hydropower regional power grid is easy to form an isolated network due to lightning or over-voltage. Because of the system power imbalance and the lack of power regulation ability, it is easy to cause the voltage instability, which affects the security and reliability of the isolated system. Therefore, the voltage control strategy of small hydropower stations is proposed with the help of small hydropower units, D-STATCOM and energy storage, aiming at the operation of small-scale hydropower stations. The results can provide technical guidance for the voltage control of isolated network operation.

**Key words:** small hydropower stations; isolated operation; voltage control strategy; energy storage; D-STATCOM

### 0 引言

我国山区小水电数量众多, 目前小水电群主要分布在广大的农村地区, 尤其是偏远山区, 有功出力取决于河流的径流量, 接受电网调度能力较差。在丰水期, 小水电群大多以满负荷运行, 由于网架相对薄弱, 往往容易造成过电压现象, 严重时可使小水电群上网的主供线路因过电压保护跳闸, 形成孤网运行的状况<sup>[1-2]</sup>。孤网运行时, 尤其是在丰小方式下, 小水电出力多, 而孤网内负荷需求小, 功率不平衡问题严重, 电网面临由频率控制和电压控制等交织在一起的安全稳定问题。此外, 小水电机组调节能力差, 小水电群孤网运行时更容易出现电压失稳的情况<sup>[3-4]</sup>。

目前, 孤网电压控制的主要措施有: 孤网系统加装电抗器; 加装有载调压器; 小水电机组进相运行; 通过一定原则策略切除水电机组<sup>[5-6]</sup>。从效果来看, 目前的控制措施

存在部分不足, 例如加装电抗器虽然能在一定程度上控制孤网电压, 但是枯水期系统电压偏低需另外投资加装电容器; 大部分小水电机组进相能力不足, 单纯依靠机组进相运行进行调压, 效果往往不够理想<sup>[7-9]</sup>。

近年来, 储能以及 D-STATCOM 越来越受人们的关注。储能的应用对电网调峰能起一定作用<sup>[10]</sup>, 将其应用到小水电站群孤网系统, 可以将孤网内盈余的功率储存起来, 在电网负荷需求大时再将储能的功率释放出去, 既避免了丰水期小水电功率过剩的问题, 又可解决小水电群孤网运行时的稳定问题; D-STATCOM 为静止同步补偿器, 它可以根据电网的需求发出感性无功或容性无功, 即具备了电容以及电感的特性, 而且随着 D-STATCOM 技术的不断发展, 其价格也逐渐降低<sup>[11-12]</sup>, 在小水电站群孤网系统加装 D-STATCOM, 对孤网电压稳定作用较大。因此, 可预

计未来储能以及D-STATCOM在孤网电压控制上的应用将愈受重视。基于此,本文借助小水电站机组、D-STATCOM和储能等设备以研究小水电站群孤网的电压控制方法,建立小水电站群孤网理想模型并对其进行仿真分析,结果表明孤网电压控制在合理范围,保证孤网安全稳定运行。

## 1 小水电站群孤网成因及运行条件

### 1.1 小水电站群孤网成因

小水电站群区域电网与主网的联络情况如图1所示,小水电站群通过联络点断路器与主网联结。

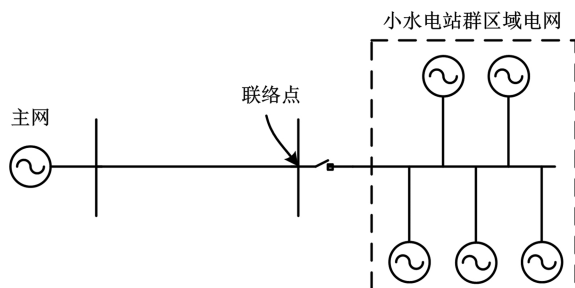


图1 小水电站群区域电网联络示意图

小水电站一般为径流式电站,无功电压调节能力相对薄弱,具有季节性强、并网点分散、机组容量较小和发电量受来水情况影响大等特点。此外,小水电主要分布在广大农村山区,该地区网架较为薄弱,线路供电半径偏大并且自动化水平偏低<sup>[3]</sup>。

在丰水期时,小水电站基本处于满发的状态,本地负荷消纳能力不足使得小水电站并网向主网输送功率。在小水电站业主恶性竞争下,并网点电压往往被抬升到一个严重越上限的水平,可能致使小水电区域电网与主网间的联络断路器跳闸,形成孤网运行的情况。

### 1.2 孤网运行条件

小水电站群孤网运行可定义为与主网分离的一部分配电网,由多个小水电站和孤网内负荷,以一定的电压频率继续稳定运行。严格来看,孤网和孤网运行稍微有所区别,可以说孤网并不总能形成孤网运行。

一般而言,小水电站群孤网运行的基本条件主要包括:

- (1) 与主网分离的配电网;
- (2) 由小水电站独立供电;
- (3) 能够继续稳定运行;
- (4) 孤网电压和频率在允许的范围内。

## 2 储能及D-STATCOM对孤网运行作用分析

近年来,利用储能以及D-STATCOM二者对小水电群孤网电压稳定的控制应用也已在试验阶段,可以预计未来储能以及D-STATCOM在孤网电压稳定上的应用将愈受重视<sup>[14]</sup>。

### 2.1 小水电站孤网电压频率情况分析

如图2所示,小水电站经升压变满足本地负荷需求(图2中 $P+jQ$ ),并向主网输送功率(图2中 $P_s+jQ_s$ )。小水电站并网稳态运行时,根据图2模型的等值电路,此时联络点电压 $U_s$ 有:

$$V_s = \frac{E_q \cos \sigma + \sqrt{(E_q \cos \sigma)^2 - 4K(P_s R_\Sigma + Q_s X_\Sigma)}}{2K} \quad (1)$$

$$K = 1 + \frac{R_\Sigma R_D + X_\Sigma X_D}{R_D^2 + X_D^2} \quad (2)$$

其中, $E_q$ 为机组空载电势; $\sigma$ 为发电机空载电势 $E_q$ 和联络点电压 $U_s$ 的夹角; $K$ 为等效系数; $R_\Sigma$ 和 $X_\Sigma$ 为系统总电阻和总电抗; $R_D$ 和 $X_D$ 为模型中本地负荷的等效电阻和电抗。

稳态运行情况下,电网频率稳定在工频50 Hz附近,小水电站机组的转子力矩平衡方程为:

$$JA = M_T - M_E \quad (3)$$

$$A = \frac{dw}{dt} = \frac{\Delta M}{J} \quad (4)$$

其中, $J$ 为转动惯量; $A$ 为转子角加速度; $\Delta M = M_T - M_E$ 为净加速转矩,其中 $M_T$ 为原动机的转矩, $M_E$ 为发电机的电磁转矩; $w$ 为角速度。

在丰水期,尤其是小水电的发电功率远大于本地负荷需求时,大量的盈余功率将通过联络点传输到主网。当联络点断路器跳闸形成孤网运行状况时,即有 $P_s=0$ , $Q_s=0$ ,此时联络点电压将在短时间内被抬升到较高的水平,甚至出现严重越上限的情况。

此外,当联络点跳闸后,负荷大幅度减少,电磁功率也随之减少,此时有 $M_T > M_E$ ,则转子角加速度 $A$ 增大,由 $w=2\pi f$ 可知,孤网内的频率 $f$ 也随着增大,严重时可能导致频率失稳。

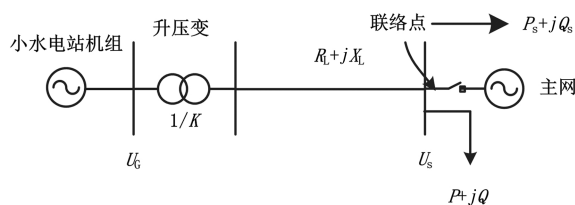


图2 小水电站地区电网等值模型

### 2.2 储能对孤网运行作用分析

储能技术是指利用设备或介质将一种能量形式通过物理或化学的方法以另一种或同一种能量形式存储起来,并能根据实际应用需要再将存储的能量以特定能量形式释放出来的循环过程。近年来,储能技术在能源、电力、交通等方面的应用得到了快速发展<sup>[15]</sup>。

小水电站群孤网运行时,小水电发出的有功功率与孤网内的有功需求严重不平衡,导致孤网频率稳定受到严重威胁。在孤网内加入储能设备后,如图3所示,孤网内过量的有功功率可通过储能设备存储起来,既能提高小水电的发电利用效率,又尽可能保证孤网频率的安全稳定。

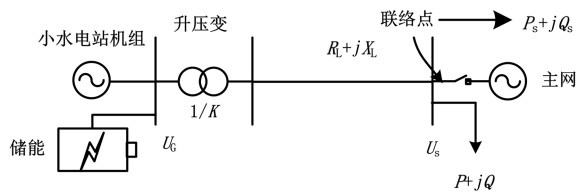


图3 加装储能的小水电站电网等效模型

### 2.3 D-STATCOM对孤网运行作用分析

孤网运行时，系统内无功功率供需严重不平衡，在丰水期时孤网内过量盈余的无功功率可致使电压在小水电站群解列后短时间内上升过高，引起孤网过电压问题；而在枯水期时孤网内过大的无功缺额可致使电压崩溃问题。

D-STATCOM 不仅可兼做容性和感性无功补偿，而且其输出的无功功率不受系统电压的影响，在电网发生电压跌落时，能及时提供无功支撑，有利于提高系统的电压稳定性。在孤网内加入 D-STATCOM 后，如图4所示，可根据系统实际需求补偿感性或容性无功，维持孤网电压在一个相对稳定的范围内。

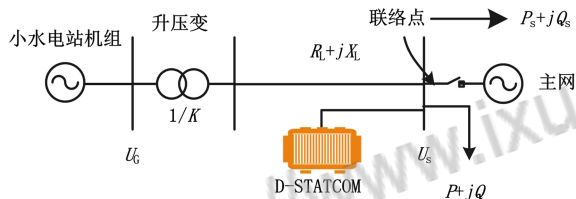


图4 小水电站地区电网的简要等效模型

## 3 孤网运行电压控制方法

小水电站群孤网运行时，孤网内的功率不平衡问题严重，电网面临由有功、无功等交织在一起的安全稳定问题。又由于小水电站一般在 10 kV 或 35 kV 配电网并网，配电线路电阻与电抗在数值上较为接近，孤网运行后的电压将受到系统内有功功率和无功功率的双重影响。因此，考虑在小水电站区域电网装设储能设备以及 D-STATCOM 以应对孤网后的电压稳定问题。

### 3.1 控制方法

为解决小水电站群孤网内的无功功率不平衡问题，本文所研究的 D-STATCOM 以维持联络点电压恒定为控制目标，采用一种跟踪型 PWM 控制对电流瞬时值进行反馈控制的方法。该方法主要以电压调节器实现，采集并网点电压并与参考值作比较，通过电流闭环控制，并采用 dq0 坐标变换法检测信号<sup>[6]</sup>。

为解决孤网内的有功功率不平衡问题，本文所研究的储能设备采用有功功率实测值和设定参考值的差值控制方法。该方法主要首先采集储能接入点有功功率值，将其与设定值进行差值计算，以此得到差值信号驱动储能设备中的控制器实现设备的充放电操作。

## 3.2 容量配置

储能设备以及 D-STATCOM 的容量配置方法需同时兼顾经济性和效果性，容量配置过大将造成资源浪费、设备利用效益偏低的问题，而配置过小又不能解决孤网面临的有功和无功问题。因此，储能设备以及 D-STATCOM 容量配置方法仍需深入研究。

### (1) 储能容量配置方法

小水电具有季节性和波动性，而且负荷需求也具有一定的波动性，使得小水电站孤网内每时每刻的有功功率都存在不同程度的差异，结合经济性，因此本文定义小水电站群孤网内储能的容量配置由下式决定：

$$E = \frac{24 \sum_{i=1}^n P_{hi} T_i}{8760D(K_h + 1)} \quad (5)$$

其中， $E$  为储能容量(kWh)； $n$  为小水电站座数； $P_{hi}$  为第  $i$  台小水电站装机容量(kW)； $T_i$  为第  $i$  台小水电站年发电小时数(小时)； $K_h$  为  $n$  台小水电站的峰谷上网电量比平均值； $D$  为储能设备的放电深度，这里取 60%。

### (2) D-STATCOM 容量配置方法

小水电站群孤网后难以保证系统内各节点电压均能维持在电压合格范围内，因此本文的研究目的是在孤网内配置 D-STATCOM 后，力求大部分节点电压在电压合格范围，而允许部分节点的电压适当偏离合格范围。所以，本节对 D-STATCOM 的容量配置原则规定为：在丰水期保证 D-STATCOM 安装点电压不高于 10.7 kV，在枯水期保证安装点电压不低于 9.7 kV。具体如下式所示：

$$\begin{cases} C_H = \frac{|(V_H - 10.7)|V_H A_r}{X_w} \\ C_L = \frac{|(9.7 - V_L)|V_L A_r}{X_w} \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{opt} = \pm \max\{C_H, C_L\} \quad (7)$$

其中， $C_{opt}$ 、 $C_H$ 、 $C_L$  分别为 D-STATCOM 的最佳配置容量、丰水期配置容量、枯水期配置容量，单位为 kvar； $V_H$ 、 $V_L$  为 D-STATCOM 安装点上一年最高和最低电压，单位为 kV； $X_w$  为 D-STATCOM 安装点的输入电抗，单位为  $\Omega$ ； $A_r$  为裕度系数，取值范围为 1.2~1.5。

## 4 仿真算例

### 4.1 仿真模型

图5为小水电站群孤网运行仿真模型，其中有5座小

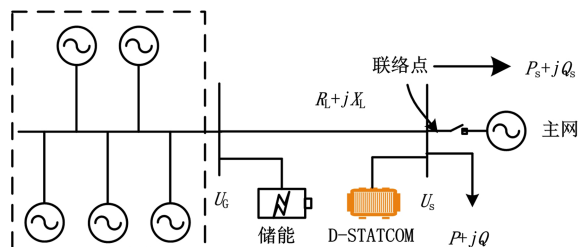


图5 仿真模型

水电站,装机容量均为350 kW,功率因数均为0.9,年发电小时数均为3 500 h,5座小水电站的峰上网电量比平均值为1.8;线路 $L$ 的电阻和电抗 $R_L+jX_L$ 为 $4.83+j5.44 \Omega$ ;本地负荷 $P+jQ$ 为 $527+j250$  kVA;系统盈余的功率 $P_s+jQ_s$ 通过联络线路传输到主网;D-STATCOM安装点上一年最高电压设置为11.55 kV,最低电压设置为9.20 kV,孤网后安装点的输入电抗为 $4.75 \Omega$ 。

## 4.2 仿真结果

在图5模型中配置储能容量为14 500 kWh,额定功率为1 000 kW;取裕度系数 $A_r$ 为1.3,D-STATCOM容量为 $\pm 1 500$  kvar。现设定在丰水期下,各小水电站满载运行,模型中联络点在某一时刻跳闸,联络点左侧电网形成小水电站群孤网状况,通过仿真分析得到图6和表1的结果。其中,场景1没有投入储能及D-STATCOM,场景2有投入。

结果表明,初始潮流下(即场景1)孤网电压被抬升到 $1.22 U_N$ ,电压严重越上限;在小水电站群孤网内投入储能设备以及D-STATCOM后,联络点电压保持在合格范围内,保证孤网的稳定运行。

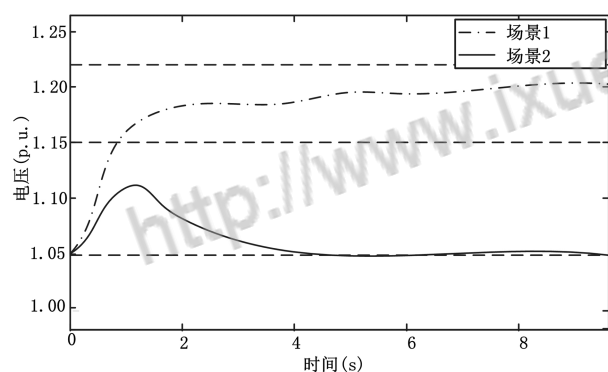


图6 联络点电压仿真曲线

表1 仿真结果汇总

| 节点名        | 场景1   | 场景2   |
|------------|-------|-------|
| 起始电压(p.u.) | 1.052 | 1.052 |
| 稳定电压(p.u.) | 1.220 | 1.050 |
| 电压合格率(%)   | 0     | 100   |
| 稳定频率(Hz)   | 54.5  | 50.3  |

## 5 结语

针对小水电站群孤网运行,首先分析了孤网的成因以及孤网运行的条件;其次,研究了孤网后系统有功以及无功功率的变化机理;接着,分析了储能以及D-STATCOM对孤网运行的有功无功支撑原理与容量配置方法;最后,提出了小水电站群孤网运行的电压控制方法。通过建模仿真结果分析,在孤网内配置储能设备以及D-STATCOM,

能在一定程度上稳定孤网电压,保证孤网后系统得以继续运行,提高小水电站的利用效益以及电网安全性。

## 参考文献:

- [1] 刘艺,叶胜,彭显刚,等.小水电群区域电网电压优化控制的应用探讨[J].电力系统保护与控制,2010,38(9):136-140.
- [2] 黄杨,张毅威,闵勇,等.水电群孤网后的安全稳定特性及控制策略[J].电力系统自动化,2012(09):1-5.
- [3] 谢高鹏.孤网运行保留小水电存在问题及解决措施[J].中国新技术新产品,2014(11):152-152.
- [4] 张明达,庄建勇,秦立明.小水电集中区域电压控制系统[J].农村电气化,2014(11):45-46.
- [5] 陈志峰,陈娟,李海锋,等.含小水电地区电网过电压分析及抑制措施[J].电力建设,2015(04):21-26.
- [6] 张洪兰.小水电系统电压无功问题及控制方案研究[D].北京:华北电力大学,2010.
- [7] 韦廷方,卫志农,张友强,等.发电机进相运行的研究现状及展望[J].电力系统保护与控制,2012(09):146-154.
- [8] 王丽莉.小水电引起配电网高电压问题的解决方案[J].浙江电力,2011(07):57-60.
- [9] 白兴东,牛启宏,郝广平,等.甘南电网孤网运行电压及其频率控制研究[J].电气自动化,2015(03):81-83.
- [10] 黄伟,崔屹平,华亮亮,等.基于小水电及储能的主动配电网电压控制[J].电力建设,2015(01):103-109.
- [11] 涂春鸣,李慧,唐杰,等.基于直接电流控制的D-STATCOM装置研制[J].高电压技术,2008(06):1173-1178.
- [12] 毛彦辉,夏明超,李晓亮,等.负载不平衡下D-STATCOM控制策略的仿真研究[J].电力系统保护与控制,2013(24):132-139.
- [13] 王文华,魏博,朱广明,等.抑制分布式小水电配电网稳态过电压的无功配置方法[J].高压电器,2015,(11):97-102.
- [14] 邝皆欣,陈志峰.含小水电上网配网线路孤网分析及故障后复电方案[J].中国高新技术企业,2016(28):117-119.
- [15] 彭思敏.电池储能系统及其在风—储孤网中的运行与控制[D].上海:上海交通大学,2013.
- [16] 刘年,陈艳,文安,等.DSTATCOM在含小水电配电网的应用研究[J].电器与能效管理技术,2014(20):52-54.

第一作者简介:李桂昌,男,1990年生,广东肇庆人,大学本科,助理工程师。研究领域:配电网电能质量管理及无功优化。  
(编辑:向飞)



知网查重限时 **7折** 最高可优惠 **120元**

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: [http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

---