

# 全功率变速抽水蓄能机组保护配置及整定方法

周文越, 史华勃, 陈刚

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**正确的保护配置和整定方法是全功率变速抽水蓄能机组安全运行的关键。结合典型全功率变速抽水蓄能机组接线方式,在分析机组运行特性的基础上,提出了适用于各种运行状态的保护配置方法;分析了变频器对机组短路特性的影响;在此基础上,提出了将复压过流保护作为特殊区域的主保护,并给出了适用的保护整定计算方法。所提出的保护配置和整定方法在春厂坝变速抽水蓄能示范电站得到了应用。

**关键词:**全功率变速抽水蓄能机组;继电保护;整定计算;发电机保护

**中图分类号:**TM 77 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)02-0028-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230205

## Protection Configuration and Setting Method of Variable-speed Pumped Storage Unit with Full-size Converter

ZHOU Wenyue, SHI Huabo, CHEN Gang

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Correct protection configuration and setting method is the key to safe operation of variable-speed pumped storage unit with full-size converter (FSC-VSPSU). Combined with the typical connection mode of FSC-VSPSU, and based on the analysis of unit operation characteristics, the protection configuration method suitable for various operating states is put forward. In view of the influence of frequency converter on short-circuit characteristics of unit, the overcurrent protection is proposed as the main protection of the special area. The applicable calculation method of protection setting is also given. The proposed protection configuration and setting method have been applied to FSC-VSPSU in Chunchang Dam Pumped Storage Power Station.

**Key words:** variable-speed pumped storage unit with full-size converter; relay protection; setting calculation; generator protection

## 0 引言

随着新型电力系统的建设,风电、光伏等波动性较大的新能源接入电网的比例越来越大,这些新能源所带来的功率波动将影响电网的安全稳定运行。变速抽水蓄能机组可实现快速的功率调节,能很好地抑制电网功率波动。因此,变速抽水蓄能机组逐渐成为这几年新能源发电的研究热点。

目前,双馈式变速抽水蓄能机组由于成本低的优势,已得到了大规模的应用。但是,受制于机组的结构,双馈式变速抽水蓄能机组能调节的功率范围

较小。相比之下,全功率变速抽水蓄能机组(variable-speed pumped storage unit with full-size converter, FSC-VSPSU)的发电机与电网完全解耦,可通过全功率变频器实现大范围的转速变化和功率调节<sup>[1-3]</sup>。但是,受制于变频器的成本,FSC-VSPSU还未得到广泛的研究和大规模的应用。

对于小型水电站,由于变频器的成本可控,FSC-VSPSU凭借优异的功率调节性能,可用于调节周边风电、光伏功率波动。因此,FSC-VSPSU发电系统在小型水力发电站的应用与升级改造具有可观的前景及重要的意义<sup>[4]</sup>。

继电保护是保证机组安全稳定运行的关键。目前,在变速抽水蓄能机组继电保护方面的研究,还仅限于双馈式变速抽水蓄能机组<sup>[5]</sup>。FSC-VSPSU在

机组结构和特性上,与双馈式变速抽水蓄能机组存在着较大区别,因此需对其保护配置和整定方法开展专门的研究。为此,对 FSC-VSPSU 的运行特性进行分析,并以此为基础开展保护配置和整定方法的研究,构建了一套适用于 FSC-VSPSU 各种运行方式和故障类型的保护配置;然后,以国家重点研发计划“分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范”项目的春厂坝变速抽水蓄能示范电站为例,研究了 FSC-VSPSU 保护及其配套设备保护的整定方法。

## 1 FSC-VSPSU 运行特性

典型的 FSC-VSPSU 一次接线如图 1 所示。正常运行状态下,变频器旁路断路器处于断开状态,机端出口断路器(GCB)处于闭合状态;同步电机通过变频器与电网相连;同步电机可处于发电和电动运行状态,同步电机的转速不固定,根据功率调节需求随时变化,因此,同步电机机端电压电流的频率也会跟着随时变化;变频器通过交-直-交变换,将同步电机机端的随频率变化的电压电流转换成与电网频率一致的电压电流,从而实现变速发电或变速抽水功能。变频器的容量与同步电机一致,因此 FSC-VSPSU 可实现在同步电机全功率和速度范围内的快速转速调节。

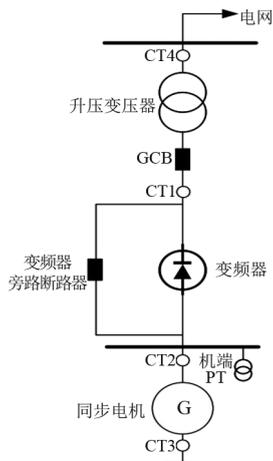


图1 典型 FSC-VSPSU 一次接线

特殊的结构使 FSC-VSPSU 的运行状态与常规抽水蓄能机组有较大区别,主要运行状态如下:

1) 当旁路断路器处于闭合状态时,变频器退出运行,同步电机直接与电网相连,FSC-VSPSU 与常规恒速抽水蓄能机组运行特性一致,FSC-VSPSU 处

于同步运行状态。

2) 当旁路断路器处于断开状态时,变频器处于运行状态,同步电机与电网非同步运行,其机端电压电流的频率随着转速变化,FSC-VSPSU 处于变频运行状态。

3) FSC-VSPSU 带变频器启动时,同步电机机端频率会由 0 逐渐升高到最低运行频率,FSC-VSPSU 处于变频启动状态。

4) FSC-VSPSU 带变频器制动时,同步电机机端频率会由运行频率逐渐降低到退出频率,FSC-VSPSU 处于变频制动状态。

另外,当变频器处于运行状态时,由于变频器的运行特性,同步电机的机端相电压和电流存在大量的谐波分量,其中以 3 次谐波及其倍数次谐波为主,如图 2 所示。

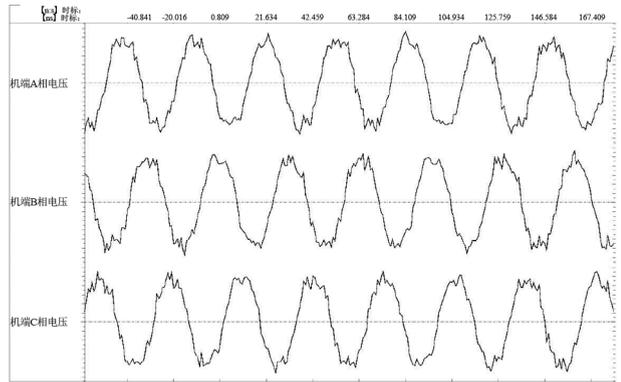


图2 变频器运行下同步电机机端电压

## 2 FSC-VSPSU 保护配置

FSC-VSPSU 继电保护装置需适应机组不同运行状态,且在各种运行状态下均能正确识别故障。因此,需针对性地对其保护配置进行研究。需要说明的是,这里所述的 FSC-VSPSU 保护配置具体指的是如图 1 所示的同步电机保护配置,而变频器保护与控制集成在一起,升压变压器则按常规变压器配置保护。

1) FSC-VSPSU 处于同步运行状态

此状态下,FSC-VSPSU 等同于常规小型恒速抽水蓄能机组,其保护配置如表 1 所示<sup>[6-7]</sup>。

2) FSC-VSPSU 处于变频运行状态

此状态下,同步电机与电网解耦。因此,需退出通过测量系统侧等效阻抗的失磁阻抗。另外,变频运行状态下机端的 3 次谐波分量可能导致定子接地

保护的 3 次谐波电压判据误动作,所以需退出此判据。保护配置如表 2 所示。

表 1 同步运行状态下保护配置

序号	保护配置
1	纵差保护
2	横差保护
3	复压过流保护
4	负序过负荷保护
5	过电压保护
6	低电压保护
7	频率保护
8	定子接地保护
9	转子接地保护
10	失磁保护
11	非电量保护

表 2 变频运行状态下保护配置

序号	保护配置
1	纵差保护
2	横差保护
3	复压过流保护
4	负序过负荷保护
5	过电压保护
6	低电压保护
7	频率保护
8	定子接地保护(无 3 次谐波电压判据)
9	转子接地保护
10	非电量保护

### 3) FSC-VSPSU 处于变频启动或制动状态

此状态下,同步电机机端电压电流的频率低于正常运行频率,依赖于频率的保护算法仅能实现工频周围小范围的频率变化跟踪。因此,在此状态下,依赖于常规频率算法的保护原理将失效,此时仅能利用适应于低频的保护算法,保护配置如表 3 所示。其中,低频差动保护作为机组的主保护,频率保护和低频过流保护作为后备保护。

表 3 变频启动或制动状态下保护配置

序号	保护配置
1	频率保护
2	低频差动保护
3	低频过流保护
4	转子接地保护
5	非电量保护

除上述的保护配置以外,对于差动保护而言,所

使用的差动电流需同步,因此:在变流器运行情况下,即 FSC-VSPSU 处于变频运行状态、变频启动状态、变频制动状态时,差动保护所用的电流应为 CT2 和 CT3 输出的二次电流;在变流器退出运行情况下,即 FSC-VSPSU 处于同步运行状态时,差动保护所用的电流应为 CT1 和 CT3 输出的二次电流。

从上述的分析可以看出,在不同的运行状态下,FSC-VSPSU 的保护配置将有所不同。FSC-VSPSU 保护装置需具备运行状态识别和保护配置切换功能,可利用同步电机机端电压电流和相应的断路器位置实现运行状态识别,并根据运行状态自动切换保护功能。具体识别方法不是所研究的重点,不再赘述。

## 3 FSC-VSPSU 及其配套设备保护整定

FSC-VSPSU 及其配套设备保护整定涉及的保护装置为如图 1 中的同步电机保护装置和升压变压器保护装置。对于变流器而言,其保护集成在内部控制逻辑中,定值根据变流器的特征内部固化,无需整定。

### 3.1 FSC-VSPSU 短路特性

短路特性直接决定保护整定原则,FSC-VSPSU 在同步运行状态下,短路特性与常规恒速抽水蓄能机组一致。

在变频器运行情况下,变频器将同步电机与电网解耦,FSC-VSPSU 的短路特性受变频器影响。对于变频器而言,变流器外部的故障,仅配置过压、过流保护。当保护动作时,为保证变流器的安全,变流器将闭锁所有电力电子元件,此时的变频器等同于开路。变频器保护动作后,变频器两端电流的变化情况如图 3 所示。从图中可看出,变频器保护动作后,其两端的电流将迅速降为 0,变频器不提供短路电流通路。

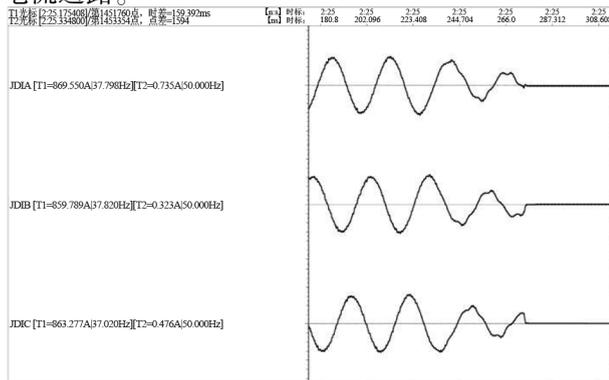


图 3 变频器故障时的电流波形

### 3.2 升压变压器整定方法

升压变压器的保护按常规 35 kV 变压器保护配置,主要配置一套差动保护作为主保护,高压侧和低压侧各一套复压过流保护分别作为各侧的后备保护。

差动保护作为升压变压器的主保护,不受 FSC-VSPSU 短路特性的影响,差动保护按照常规变压器整定原则整定。

高压侧复压过流保护作为升压变压器本体及其低压侧出线的后备保护,其定值应按升压变压器低压侧短路有灵敏度整定;为保证动作的选择性,动作时限按与升压变压器低压侧后备保护配合整定。

低压侧复压过流保护作为升压变压器低压侧出线的后备保护,在变频器退出运行的情况下,其保护范围应为升压变压器低压侧至同步电机中性点出口。在此情况下,其定值应按同步电机中性点出口短路有灵敏度整定,动作时限按与同步电机后备保护配合整定。

在变频器运行的情况下,同步电机与电网解耦。在此情况下,低压侧复压过流的保护范围无法越过变频器,其保护范围最多只能到变频器断路器与电网侧接口处,因此其定值应按升压变压器低压侧短路有灵敏度整定。另一方面,由于变频器不会给短路电流提供通路,在变频器运行的情况下,变频器网侧出口至升压变压器低压侧 CT1 这一段发生短路时,没有主保护可动作。因此,需要将升压变压器低压侧复压过流作为此段的主保护,此时的保护定值应按升压变压器低压侧短路有灵敏度整定。

综上所述,升压变压器低压侧复压过流保护应设置两段定值:1) I 段定值应按升压变压器低压侧短路有灵敏度整定。由于 I 段保护是作为变频器运行的情况下,变频器网侧出口至升压变压器低压侧 CT1 这一段的主保护,因此 I 段时限应尽可能小,可按躲过励磁涌流整定。2) II 段定值按同步电机中性点出口短路有灵敏度整定,动作时限按与同步电机后备保护配合整定。

除此之外,过负荷、非电量等升压变压器的其他保护,按常规 35 kV 变压器保护整定原则整定即可。

### 3.3 同步机组整定方法

FSC-VSPSU 处于同步运行状态时,运行特性与常规恒速抽水蓄能机组一致,因此整定方法也一致。具体整定方法参考 DL/T 2380—2021《抽水蓄能电站发电电动机变压器组继电保护整定计算技术规范》<sup>[8]</sup>。

FSC-VSPSU 处于变频运行状态时,与常规恒速抽水蓄能机组整定方法不一致的地方如下:

1) 变频运行状态时,机端电压的 3 次谐波较大,需退出 PT 中线断线判别控制字。

2) 由于变频器不会给短路电流提供通路,在变频器运行的情况下,变频器机侧出口至同步电机出口 CT2 这一段发生短路时,无主保护可动作。因此,需要将相间后备保护作为此段的主保护,此时的保护定值应按变频器机侧出口短路有灵敏度整定,动作时限按躲过短路暂态过程整定,尽量降低时限。另外相间后备保护还应作为同步电机短路的总后备,因此,相间后备保护应增加一段保护定值,按躲过同步电机最大运行电流整定,动作时限与上一级保护配合整定。

3) 由于同步电机与电网不同步,频率保护定值不应与电网频率保护配合。过频保护定值按与同步电机机械超速保护配合整定,低频保护定值按躲过最小抽水频率整定。

FSC-VSPSU 处于变频启动或制动状态时,低频差动保护、低频过流保护作为此状态下的专用保护,整定方法如下:

1) 低频差动保护作为主保护,整定方法参考常规差动保护,按躲过不平衡电流整定;

2) 低频过流定值保护做低频运行下的总后备保护,按躲过最大运行电流整定,动作时限按躲过短路暂态过程整定。

## 4 保护配置及整定方法工程实践

所提出的 FSC-VSPSU 保护配置及整定方法在春厂坝变速抽水蓄能示范电站得到了应用。该电站依托国家重点研发计划项目“分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范”修建,在原有电厂的 2 号主变压器 35 kV 中压侧新投 5 MW 全功率变速抽水蓄能机组、升压变压器以及相关配套设备,保护配置如表 4 所示。

35 kV 升压变压器配置 3 套保护装置,差动保护装置、高压侧后备保护装置和低压侧后备保护装置,相关保护定值按第 3.2 节提出的方法整定。

同步机组配置 3 套保护装置,FSC-VSPSU 变频运行状态(包括变频启动和制动状态)下投入差动

(下转第 58 页)

- [11] ARUNKUMARI T, INDRAGANDHI V. An overview of high voltage conversion ratio DC-DC converter configurations used in DC micro-grid architectures[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 77: 670-687.
- [12] MALEKI M G, JAVADI H, KHEDERZADEH M, et al. Data exchange standardization in a microgrid protection scheme according to the IEC 61850[C]//2015 Smart Grid Conference(SGC), Tehran, Iran, IEEE:2015.
- [13] GHOTBI-MALEKI M, JAVADI H, KHEDERZADEH M, et al. An adaptive and decentralized protection scheme for microgrid protection[C]//2016 Power System Protection and Control Conference (PSPC), 2016.
- [14] SHEN S F, DA L, WANG H F, et al. An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized Thevenin equivalent parameters

estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(1):411-419.

- [15] 井淳子.逆变器型 DG 接入配电网对的影响及对等研究[D].西安:西安理工大学,2019.

#### 作者简介:

糟伟红(1995),女,硕士,助理工程师,研究方向为可再生能源并网技术;

祁晓笑(1980),女,硕士,高级工程师,研究方向为大电网安全运行控制;

董雪涛(1988),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统规划、电力系统运行及电网安全分析等;

李德存(1981),男,高级工程师,主要从事电气试验和电气基建调试工作;

职凯华(1997),男,硕士,主要研究方向为继电保护。

(收稿日期:2022-06-09)

(上接第 31 页)

保护装置和变频运行后备保护装置,同步运行状态下投入差动保护装置和同步运行后备保护装置。不同状态下保护装置的切换、保护功能的投切、保护 CT 的切换均依靠控制系统根据机组运行状态自动进行,机组保护相关定值按第 3.3 节提出的方法整定。

在春厂坝变速抽水蓄能示范电站 FSC-VSPSU 调试期间,保护未发生误动事故,且两次正确动作切除了故障:第一次是转子磁场偏移导致横差电流偏大,横差保护动作切除了机组;第二次是机组控组策略问题导致机端电压升高,过电压保护动作切除了机组。

表 4 春厂坝 FSC-VSPSU 保护配置

一次设备	保护配置
35 kV 升压变压器	变压器差动保护装置
	高压侧后备保护装置
	低压侧后备保护装置
同步机组	差动保护装置
	变频运行后备保护装置
	同步运行后备保护装置

## 5 结 论

上面在分析 FSC-VSPSU 运行特性的基础上,提出了 FSC-VSPSU 保护配置和整定方法,解决了 FSC-VSPSU 继电保护运行难题。所提出的方法运用于国家重点研发计划“分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范”项目的春厂坝变速抽水蓄能示范电站,保证了电站在试运行期间的安全稳定。另外,受制于保护改造成本和技术升

级风险,所提出的保护配置和整定方法均是在现有技术上的改进,下一步还需对 FSC-VSPSU 运行及故障特性进行深入研究,提出更具针对性的保护配置和整定方法。

#### 参考文献

- [1] 畅欣.FSC 可变速抽水蓄能机组功率调节特性研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [2] 畅欣,韩民晓,郑超.全功率变流器可变速抽水蓄能机组的功率调节特性分析[J].电力建设,2016,37(4):91-97.
- [3] 史华勃,王渝红,滕予非,等.全功率变速抽水蓄能机组快速功率模式小信号建模[J].电力系统自动化,2022,46(4):162-169.
- [4] 戴理韬,高剑,黄守道,等.变速恒频水力发电技术及其发展[J].电力系统自动化,2020,44(24):169-177.
- [5] 梁廷婷,王凯,陈俊,等.变速抽水蓄能机组继电保护方案研究[J].水电与抽水蓄能,2020,6(5):62-67.
- [6] 中国电力企业联合会.抽水蓄能发电电动机变压器组继电保护装置技术条件:DL/T 2018—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.
- [7] 陈俊,王凯,袁江伟,等.大型抽水蓄能机组控制保护关键技术研究进展[J].水电与抽水蓄能,2016,2(4):3-9.
- [8] 中国电力企业联合会.抽水蓄能电站发电电动机变压器组继电保护整定计算技术规范:DL/T 2380—2021[S].北京:中国电力出版社,2022.

#### 作者简介:

周文越(1989),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护。(收稿日期:2022-07-24)