

农村小型水电站励磁系统改造设计^{*}

祁正栋, 周小鸿, 陈国平

(新疆理工学院 机电工程学院, 新疆 阿克苏 843000)

摘要: 针对新疆老旧小型水电站发电机普遍采用双绕组电抗分流自励恒压系统, 在并网运行时容易产生振荡、失磁, 甚至失步而解列现象, 导致并网运行困难的问题, 设计了一种改造简单、成本低、并网运行可靠、安全性好的新励磁方法, 即可控两相零式电抗分流励磁系统。试验表明, 该系统比原系统电压整定范围大且经济, 能可靠并网运行, 在小型水电站自励恒压同步发电机运行中该系统是一种值得推荐的新励磁系统, 对设计改造农村小型电站具有应用参考价值。

关键词: 同步发电机; 励磁系统; 小水电站; 改造

中图分类号: TM 622 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0082-05

doi: 10.12177/emca.2020.051

Design and Transformation of Excitation System for Small Hydropower Station in Rural Areas^{*}

QI Zhengdong, ZHOU Xiaohong, CHEN Guoping

(School of Technical and Electrical Engineering Department, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843000, China)

Abstract: For the generators of old small hydropower stations in Xinjiang, the dual-winding reactance shunt self-excitation constant voltage system is commonly used, which is prone to oscillation, demagnetization and even out-of-step disconnection during grid-connected operation. For these problems, a new excitation method with simple transformation, low cost, reliable grid-connected operation and good safety, namely, the two-phase half-wave reactance shunt excitation system, is proposed. Test results show that the new system has a larger voltage setting range than the original system, and it is economical in hydropower station transformation and can support reliable grid-connected operation. It is recommended to use this system in the operation of self-excited constant voltage synchronous generators of small hydropower stations in rural areas.

Key words: synchronous generator; excitation system; small hydropower station; transformation

0 引言

在中国农村及小型电站中同步发电机广泛采用双绕组电抗分流自励恒压系统, 该系统具有励磁功率小、强励磁性能好、动态响应快以及结构简单、成本低、操作和维修容易等优点, 是大部分农村小型水电站发电机所普遍采用的主要励磁方

式^[1-3]。但采用这种励磁方式后, 发电机在并网时其外特性与电网电压调整特性不同, 容易产生振荡、失磁, 导致并网运行困难, 甚至发生安全事故, 造成水电站资源浪费与经济损失^[4-6]。

为了解决双绕组电抗分流自励恒压系统并网难的问题, 已有不少研究对双绕组电抗分流自励恒压系统做过相关改进。如: 湖南省辰溪县罗子

收稿日期: 2020-04-07; 收到修改稿日期: 2020-04-30

^{*} 基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2019D01C055)

作者简介: 祁正栋(1987—), 男, 硕士, 研究方向为机械及电机控制。

通信作者: 周小鸿(1962—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与安全可靠。

水电站装有该系统的水轮发电机组,7年间一直未能实现并列运行,只好轮流用电,对该系统进行改装后使发电机实现了稳定并网发电且运行一直正常,每年给电站带来盈利^[7]。南丰县圯际水电站设置有该系统水轮发电机在并入县电网时,出现抢发无功,或大量吸取电网无功,产生严重振荡,稳定性差,导致无法与县电网并列运行。对该电站进行了相应的改造,使得发电机能够稳定地与县电网并列运行,效果明显^[8]。此外,浙江省常山县水电局^[9]、山西省忻州市水利局^[10]、湖北省咸丰县电力公司^[11]、瑞安市仙人岩水电站^[12]等均对励磁系统进行技术改造,实现了稳定并网及取得了良好经济效益。目前,新疆农村小型水电站有85%以上是20世纪90年代以前建成,所选用设备基本上装设该励磁系统,普遍存在性能差、噪音大、运行效率低、并网难等问题^[13-14]。

本文设计了一种可控两相零式电抗分流励磁系统,该系统可以很方便地在原有双绕组电抗分流自励恒压系统上改装,发挥其扰动调节和按偏差调节2方面的优点,解决了原励磁系统并网难的问题。

1 原理与结构设计

可控两相零式电抗分流励磁系统,结构上由两相零式励磁系统和双绕组电抗分流自励恒压系统相结合。

两相零式励磁系统具有元件少、电压整定范围大、频率特性好,特别是能满足并网运行等优点^[15-17]。但是单独采用,也存在一些缺点,如两相零式半波整流,占用的励磁容量太大,特别是系统的励磁电压应按强励要求设计,占用的容量就更大,又是采用自励方式,必然要影响主机出力。再者,由于该系统采用主控方案,一旦控制或触发回路发生故障,将迫使电站停电。同时,由于该系统没有反锁环节,可控硅导通角变化范围又很宽,增加了微积分电路可提高稳定性,但会增加时间常数,使静态电压调整率变差(约为 $\pm 2\%$)。此外,强磁性能和波形也较差。由于以上缺点,使得两相零式励磁广泛用于农村小型低压机组受到限制。

双绕组电抗分流自励恒压励磁系统由于在发

电机主绕组尾端串接了电抗器,从而使其占用的励磁功率减少,而且强励磁性能好(强励倍数高, $K_{\text{强}} \geq 1.8$,能直接起动同容量的异步电机)、运行可靠、维护简单、成本低廉,但是并网运行困难、电压整定范围小、频率特性差^[18-20]。

针对上述问题,考虑把这2种励磁方式适当结合。在复励分量方面由分流电抗器供给,自励分量和补差方面均有两相零式方面供给,双绕组电抗分流自励恒压系统发电机励磁调节环节是建立在两相零式励磁系统测量到的电压偏差上进行调节,调节的最终作用使可控两相零式电抗分流励磁系统所产生的总励磁电流趋向稳定变化,进而使发电机端电压达到稳定状态,能稳定并网,也就是说整个励磁控制通过两相零式励磁系统(励磁调节基于偏差调节)来调节双绕组电抗分流自励恒压系统(励磁调节基于扰动调节)的励磁电流,使其达到控制发电机端电压的作用,最终稳定并网。这2种励磁方式相辅相成,兼有各自优点,消除各自的缺点,且改造方便,原发电机不必拆卸和停机,使得发电机各方面性能均大幅提高,特别是解决了并网难问题。可控式两相零式励磁系统电气原理图如图1所示。主要原理:同步发电机端的电流互感器TA1、TA2测量获得调差范围,调差电阻 R_1 、 R_2 进行调节,调节后的电流再经整流二极管VD1~VD6构成三相桥式整流电路进行整流,再通过常规电阻 R_3 降压,电容 C_1 滤波后送到由稳压管VS3、VS4,常规电阻 R_{15} 、 R_{16} 组成的对称比较桥电路进行比较,测得偏差电压信号,测量桥进行输出;测量桥输出电压信号较弱,且存在不稳定现象,通过常规电阻 $R_4 \sim R_7$ 、电容 C_2 构成微积分电路,以及联合整流二极管VD16进行稳定、加速作用后进入晶体管T1将信号进一步放大;放大后电压信号再经过主要由单结晶体管T2、T3以及脉冲变压器MB组成的触发电路后形成脉冲并输出;可控硅整流器获得触发信号,控制可控硅导通角,改变可控硅分流,改变励磁电流,从而调节发电机端电压,达到稳定并网。

图1中的整流变压器次级电压可以设计很低,试验证明,只要按额定励磁电压设计即可满足要求,以现场250 kW发电机为例,其整流变压器二次侧相电压计算如下:

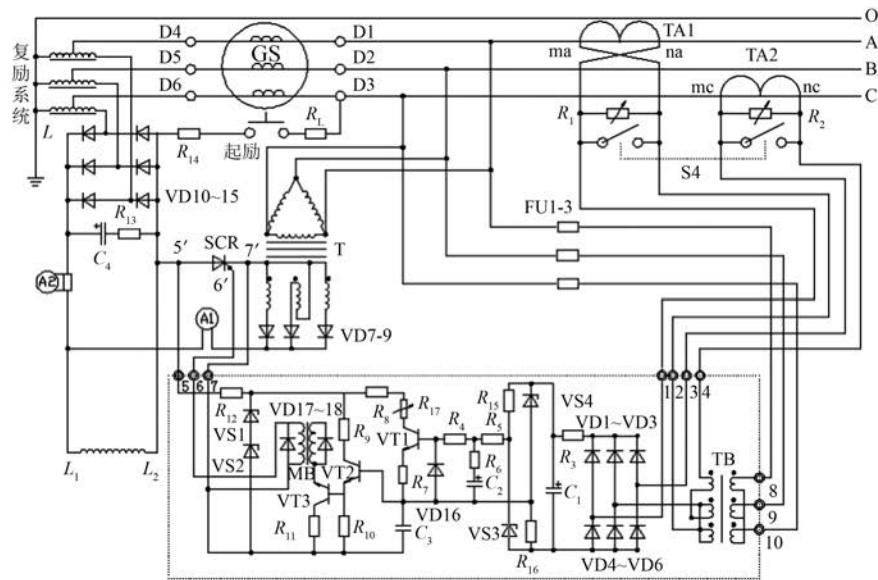


图 1 可控两相零式励磁系统电气原理图

$$U_2 = \frac{1.05U_{\text{额}}}{0.9} = \frac{1.05 \times 43\text{V}}{0.9} = 50\text{V} \quad (1)$$

在以上电压下,发电机端电压在 450 V,总励磁电流等于额定励磁电流,cosφ=0.4 时可控硅的导电角约为β=230°,此时流过可控硅的平均最大电流为 I_{SCRmax}=54 A。

采用以上值作为计算变压器或绕组所占容量比较恰当,则变压器或电机绕组每相所提供的直流电流分别为

$$I_{A2d} = \frac{1.5 \times 0.225\text{V}}{(1.5 + 1 + 0.834) \times 0.225\text{V}} \times 54\text{A} = 24.3\text{A} \quad (2)$$

$$I_{B2d} = \frac{1 \times 0.225\text{V}}{(1.5 + 1 + 0.834) \times 0.225\text{V}} \times 54\text{A} = 16.2\text{A} \quad (3)$$

$$I_{C2d} = \frac{0.833 \times 0.225\text{V}}{(1.5 + 1 + 0.83) \times 0.225\text{V}} \times 54\text{A} = 13.5\text{A} \quad (4)$$

因为励磁变压器三相绕组中的电流不相等,所以绕组的线规按照较大电流计算,则励磁变压器二次绕组电流(或附加绕组中流过的两相零式的电流)为

$$I_2 = 1.57 \times I_{A2d} = 1.57 \times 24.4\text{A} = 38.3\text{A} \quad (5)$$

励磁变压器二次容量:

$$P_2 = 3U_2I_2 = 3 \times 50\text{V} \times 38.3\text{A} = 5.75\text{kVA} \quad (6)$$

若单独采用两相零式励磁系统,同理可计算出励磁变压器二次侧相电压 U₂=65 V;励磁变压器二次绕组电流 I₂=125.6 A;变压器容量 P₂=24.5 kVA。

由以上计算可知,如果单纯采用两相零式励磁系统,变压器容量将高达 25 kVA,现在只需 6 kVA,容量还不到前者 1/4。因此,可控两相零式励磁系统所需变压器容量很小,较经济。

2 试验项目

250 kW 水轮发电机,型号为 TSWN2 85/31-8 型,原有励磁方式为双绕组电抗分流励磁,各项基本参数如表 1 所示。

表 1 250 kW 水轮发电机基本参数	
参数名称	参数值
额定容量/kVA	400
额定电压/V	400
定子额定电流/A	451
额定励磁电压/V	43
额定励磁电流/A	114
空载励磁电压/V	14
空载励磁电流/A	45

可控两相零式电抗分流励磁系统在空载(250 kW)状况下输出电压波形如图 2 所示。其

中, I_K 是两相零式电抗分流励磁系统可控硅整流器输出电流; I_S 是双绕组电抗分流励磁系统电抗器分流所产生的复励分量; U_B 是整流变压器电压。当发电机空载运行时, 可控两相零式电抗分流励磁系统端电压整定范围为 290~480 V, 比原系统双绕组电抗分流自励恒压系统电压(表 1)整定范围有显著增加。

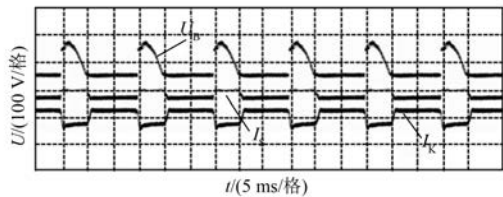


图2 空载状况下输出电压波形

图 3 所示为可控两相零式励磁系统与负载 440 V 电网并联运行时励磁电流合成情况。其中, 线电压 $U_L = 440$ V, 线电流 $I_L = 225$ A, $I_K = 57$ A, $I_S = 42$ A。可知 I_S 与 I_K 刚好互补, 可抵消波动, I_S 与 I_K 合成了较平稳的总励磁电流 I_Z , 从而

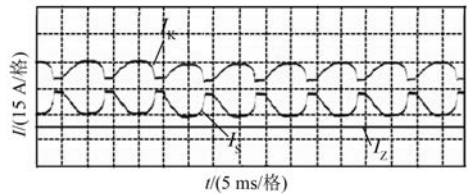


图3 与负载 440 V 电网并网时的励磁电流合成情况

使发电机产生较稳定端电压, 达到了稳定并网。

3 系统评价

该系统改造简单, 成本低, 比其他励磁系统所使用的电抗器、可控硅元件等元件数量少, 整流变压器容量小, 整体经济。不同励磁方式的经济指标比较^[21-22]如表 2 所示。

在性能指标上该系统并网运行可靠、安全性好, 与原系统相比, 除了能解决并网难问题之外, 在性能上比原系统的电压调整范围宽, 具有励磁占用容量小等优点, 不同励磁方式的性能指标比较^[23-24]如表 3 所示。

表 2 不同励磁方式的经济指标比较

励磁方式、经济指标及比较的项目	双绕组电抗分流自励恒压系统	两相零式电抗分流励磁系统	可控交流侧分流的 双绕组电抗分流自励恒压系统	可控两相零式电抗 分流励磁系统
电抗器(容量)	有(较大)	有(较小)	有(较大)	有(较小)
可控硅元件(容量)	-	1只(较大)	1只(小)	1只(较小)
控制触发回路	-	有	有	有
整流变压器(容量)	-	有(很大)	有	有(很小)

表 3 不同励磁方式的性能指标比较

励磁方式、性能指标及比较项目	一般双绕组电抗 分流自励 恒压系统	改进附绕组超前双绕组 电抗分流自励 恒压系统	可控交流侧分流 双绕组电抗分流 自励恒压系统	两相零式电抗 分流励磁系统	可控两相零式电抗 分流励磁系统
与电网并联情况	不能并网	有限并网	有限并网	能并网	能并网
静态电压调整率	差, ±5.0%	最差, ±8.0%	最好, <±1.0%	较好, ±1.0%	最好, <±1.0%
电压调整范围	最窄	最窄	窄	宽	宽
励磁占用的容量	小	小	小	大	小

由以上可知, 该系统比单独采用双绕组电抗分流自励恒压系统或两相零式励磁系统在成本方面经济, 同时比其他的常见励磁方式在各项性能指标上优势显著。

4 结 语

基于两相零式电抗分流励磁系统与双绕组电

抗分流自励恒压系统的可控两相零式电抗分流励磁系统, 与原励磁系统相比各方面的性能均显著提升, 特别是解决了双绕组电抗分流自励恒压系统难并网难的问题, 具有改造简单、成本低、并网运行可靠、安全性好等优势, 今后在农村中小型水电站自励恒压同步发电机运行中, 可控两相零式电抗分流励磁系统是一种值得推荐的

新励磁系统。

【参考文献】

- [1] 蒋雪峰, 黄文新, 郝振洋, 等. 双绕组永磁容错电机驱动的垂直提升系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3054.
- [2] 苏文兵. 双绕组无刷直流电动机电气故障及可靠性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [3] 原文林, 万芳, 马跃先. 农村小型水电站增效扩容改造关键应用技术研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(10): 190.
- [4] 邹韬, 李志瑶, 左恒奕, 等. 农村小型水电站增效扩容改造方案研究[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(12): 60.
- [5] 唐力, 李兴文. 右江水力发电厂励磁系统技术改造[J]. 广西水利水电, 2019(6): 62.
- [6] 赵曙伟. 发电机低励失磁故障事件分析[J]. 广东电力, 2018, 31(3): 80.
- [7] 贺季煌. 双绕组电抗分流自励恒压发电机并车的简易方法[J]. 水力发电, 1988(3): 58.
- [8] 赵令骥. 小型水电站发电机励磁系统的改进[J]. 电世界, 2014, 55(1): 19.
- [9] 王一鹏. 小型水电站励磁改造的一种方法[J]. 水力发电, 1993(11): 63.
- [10] 张占云. 自励恒压发电机组上网问题分析[J]. 水利技术监督, 2009, 17(3): 55.
- [11] 孙陈敏. 小型水轮发电机励磁方式改进一法[J]. 农村电工, 2004, 12(9): 27.
- [12] 朱朝晓. 仙人岩水电站发电机励磁系统的技术改造[J]. 中国水能及电气化, 2012(12): 46.
- [13] 塔义尔·肉孜, 金培军. 新疆小型水电站发展现状和技术改造方法浅议[J]. 中国农村水利水电, 2009(6): 148.
- [14] 吐尔洪·肉斯旦. 小型水电站技术改造探讨[J]. 水利技术监督, 2016, 24(6): 83.
- [15] 天津电气传动设计研究所. 两相零式自励励磁系统[J]. 中小型电机技术情报, 1978(2): 14.
- [16] 金泽文, 刘绍华. 纱帽电站励磁系统改造[J]. 农村电气化, 2009(2): 49.
- [17] 龚春英, 严仰光. 无刷发电机脉宽调制励磁系统的自激特性[J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(3): 370.
- [18] 曹方森, 安春爱. 小水电励磁装置可控硅元件故障处理二例[J]. 水电站机电技术, 2015, 38(10): 32.
- [19] 吕熟英, 熊杰. 一起农村小水电站发电机励磁故障的处理[J]. 小水电, 2013(2): 71.
- [20] SHI X J, LIU L S, WANG Z. Influence on the excited converter capacity of variable speed dual stator-winding induction generator system by excited capacitor[J]. Advanced Materials Research, 2012, 433-440: 7300.
- [21] 赵令骥, 符志勇. 小型无刷励磁发电机励磁系统的改进[J]. 电世界, 2012, 53(4): 30.
- [22] 杨帆. 60 MW 发电机励磁系统研究与实现[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [23] 周江, 沈燕. 赛珠水电站发电机励磁系统改造方案的探讨[J]. 科技与企业, 2016(2): 237.
- [24] 邓昭俊. 小水电自并励发电机励磁控制系统研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.

(上接第 67 页)

- [8] 陈天一, 陈来军, 汪雨辰, 等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步发电机平衡电流控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 904.
- [9] 万晓凤, 胡海林, 聂晓艺, 等. 电网电压不平衡时的改进虚拟同步机控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3573.
- [10] 郭岩, 郑天文, 司杨, 等. 基于动态电压补偿的 VSG 电流平衡及峰值电流控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 108.
- [11] 年珩, 教煥宗, 孙丹. 基于虚拟同步机的并网逆变器不平衡电压灵活补偿策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 123.
- [12] 何安然, 侯凯, 王小红, 等. 不对称条件下的储能虚拟同步发电机低电压穿越控制技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 122.
- [13] 赵新, 金新民, 周飞, 等. 基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 84.
- [14] 党克, 郑玉浩, 严干贵. 不平衡电网电压下光伏逆变器控制方法的改进研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 1958.
- [15] 肖湘宁, 陈萌. 不平衡电压下虚拟同步发电机功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 193.