

可控两相零式电抗分流发电机励磁系统 仿真研究

牛伟¹ 康志林² 齐家伟¹ 杨杰¹

(1. 甘肃电器科学研究院 2. 天水师范学院)

摘要: 高电压大电流电器试验单一接入的电网往往不足以提供足够大电源,需要引入发电机并网运行,电力励磁系统是发电机的主要构成部分,会影响发电机的并网能力,控制同步发电机的励磁系统是保证发电机正常运行的主要手段。可控两相零式电抗分流励磁系统,是将可控两相零式励磁系统与双绕组电抗分流自励恒压励磁系统相结合的一种新型的励磁系统。本文运用 Matlab 软件中的 Simulink 功能模块对同步发电机的可控两相零式电抗分流励磁系统进行仿真,并建立了 Simulink 数学模型,对此同步发电机励磁系统进行研究,仿真设计了一种可控两相零式电抗分流励磁系统来保证发电机的稳定并网,解决了中小型发电机组选用双绕组电抗分流自励恒压励磁系统并网运行困难的问题。

关键词: 励磁系统; Matlab 仿真; Simulink 数学模型; 发电机并网

0 引言

目前,我国在中小型发电机中普遍采用的励磁系统是双绕组电抗分流自励恒压系统^[1],具有励磁功率小(由于串接了电抗器)、强励性能好、动态响应快以及结构简单、成本低廉、操作和维修容易等优点。但是,由于采用这种励磁方式后,发电机的外特性(可用发电机端电压 U_G 和无功电流 I_{GQ} 表示)与电网电压调整原理不同,容易使发电机产生振荡现象,因此给并网运行带来了困难。并网运行困难是双绕组电抗分流自励恒压系统需要解决的关键环节,是目前国内生产厂家和装设此种励磁系统的发电机系统未圆满解决但又亟待解决的问题。

此外,国内还研究出一种励磁系统——可控两

相零式励磁系统,此励磁系统容易使发电机并网运行^[2]。选择两相零式励磁系统也有缺陷,第一,采用自励方式,会影响发电机的输出功率大小;第二,当晶闸管回路或触发回路发生故障,将使发电机组断电;第三,强励性能不太好,波形较差。由于以上缺点,使可控两相零式励磁应用于发电机组受到限制。因此,有必要进一步研究发电机励磁系统以确保发电机组的稳定并网运行。

1 可控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结合两种励磁系统,复励分量方面由电抗分流励磁系统供给,放大分量方面(如电网电压很高,输出无功较大等所致的励

磁电流增大的情况)由可控两相零式励磁系统供给。可控两相零式电抗分流励磁体系结合了两种励磁系统的特点,它们之间是互相补充,取长补短的,可控两相零式电抗分流励磁系统各方面的性能都较单独采用两种励磁系统之一得到了提高,特别是可以解决单独采用双绕组电抗分流励磁系统并网运行困难的问题。

励磁系统就是使发电机获得励磁电流的系统,他励和自励是发电机励磁系统的两种基本方式,发电机他励方式励磁采用的电源和发电机没有直接电气联系,常见的有直流励磁机、交流励磁机^[3]。因为存在电气隔离,发电机的运行状态不会影响励磁电源,从而避免电源谐波的干扰,可靠性高但是其可实现功能很少。自励指的是励磁电源的获取来自发电机本身,如晶闸管自并励励磁系统。可控两相零式电抗分流励磁系统采用的供电形式是自励,此系统属于晶闸管自并励励磁系统的一类。

如图1所示的励磁系统,在自并励晶闸管静止励磁系统中^[4],发电机的励磁电源由励磁变压器T供给^[5],励磁调节器通过控制晶闸管的导通角进行调节。这种励磁方式不是直流励磁机,故不存在碳刷和换向器磨损及环火等问题。调节速度快,动态性能好。

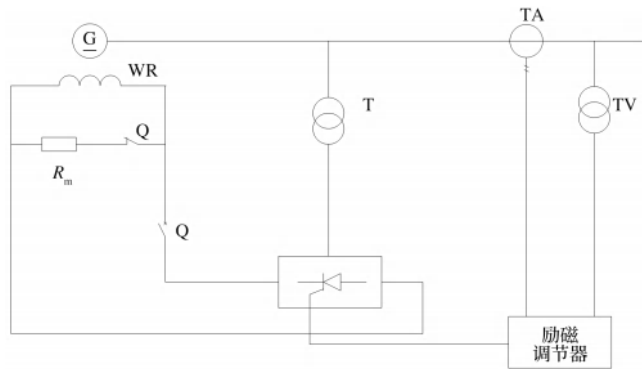


图1 自并励晶闸管静止励磁系统

仿真研究不受实体发电机励磁系统规模和电路结构复杂的影响,可保证励磁系统和操作人员的安全,仿真过程可修改,不会造成事故,现在软件仿真已成

为分析和研究电力系统很有效的方法^[6]。从安全、经济和方便快捷等方面考虑,采用软件仿真的方法模拟研究发电机励磁系统都是可行的。

2 励磁电流对发电机的影响

2.1 同步发电机单机运行

图2是同步发电机在稳定运行时的等值电路,其中 \dot{E}_q 为空载电势, X_d 为直轴的同步电抗。则发电机端电压 \dot{U}_G 与空载电势 \dot{E}_q 的关系为:

$$\dot{E}_q = \dot{U}_G + j\dot{I}_G X_d \quad (1)$$

式中, \dot{I}_G 为发电机的定子电流。

经过向量推导可以得到:

$$E_q \cos \theta = U_G + I_G X_d \sin \phi \quad (2)$$

式中, $I_G \sin \phi$ 为无功电流 I_{GQ} ,即 $I_{GQ} = I_G \sin \phi$ 。

因为 θ 较小,则可使 $\cos \theta \approx 1$,则发电机空载电势可近似表示为:

$$E_q = U_G + I_{GQ} X_d \quad (3)$$

根据式(3)可画出用发电机端电压 U_G 和无功电流 I_{GQ} 表示的外特性,如图3所示。

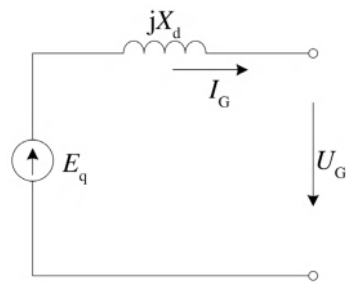


图2 等值电路

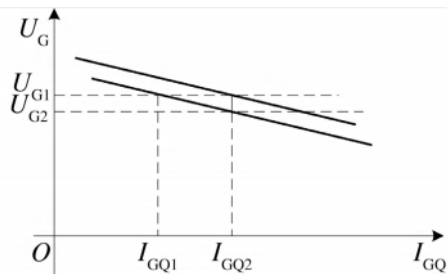


图3 发电机外特性

从图 3 发电机外特性图中可以看出，发电机无功电流的增加使得发电机端电压下降。在发电机励磁电流与空载电势 E_q 不变的情况下，发电机端电压 U_G 随着无功负荷电流 I_{GQ} 增加而减小，当无功负荷电流从 I_{GQ1} 增加到 I_{GQ2} 后 ($I_{GQ1} < I_{GQ2}$)，发电机端电压将从 U_{G1} 下降到 U_{G2} ($U_{G1} > U_{G2}$)，如果发电机在无功负荷电流值为 I_{GQ2} 下仍要维持发电机端电压不变，则必须调节发电机励磁电流使外特性上移，将空载电势 E_q 增大。

由以上分析可以看出，单独运行的发电机中引起发电机端电压 U_G 变化的主要原因是无功负荷电流 I_{GQ} 变化，要想维持发电机的端电压不发生变化，则必须相应地调整励磁电流大小。因此，当发电机单机运行时，改变励磁电流将导致发电机端电压发生变化^[7]。

2.2 发电机与电力系统并联运行

发电机和电力系统共同并联运行时，可认为电力系统的电压 U_s 是不变的，因此并联时发电机端电压 U_G 就等于电力系统的电压 U_s ，即 $U_G = U_s$ 。当有功

功率 P 的输出维持固定值时，有 $P = \frac{E_q U_s}{X_d} \sin \theta$ 不变或 $P = U_s I_G \cos \phi$ 不变。

因为 U_s 是不变的，则 $E_q \sin \theta$ 不变， $I_G \cos \phi$ 也是不变的。可见发电机无功电流增大，结果使发电机送入电力系统的无功功率改变。由此，当发电机和无穷大系统并联，可以通过励磁电流的变化改变发电机无功功率输出的变化。

3 可控两相零式电抗分流励磁系统工作原理

3.1 可控两相零式电抗分流励磁系统电气原理图

如图 4 所示为励磁系统电气原理图。

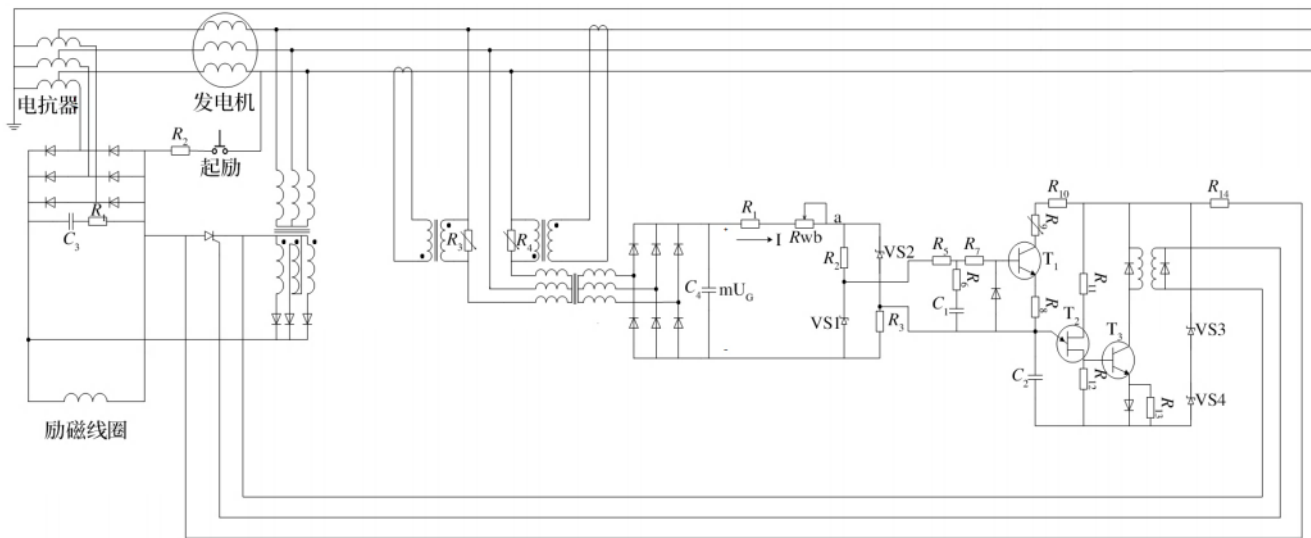


图 4 可控两相零式电抗分流励磁系统电气原理图

其主要由可控两相零式励磁单元、电抗分流励磁单元、起励单元、测量调差单元、对称比较桥单元、移相触发单元组成^[8]。首先，测量调差单元中的变压器将发电机发出的电压（采用的发电机的额定电

压为 400V 线电压）转换为 12V 的线电压，此时变压器二次侧的 12V 线电压为交流电，然后经过一个二极管三相整流桥，这时会整流出一个极不平滑的类似波浪状的直流电，本励磁系统在三相整流桥后并联一个

电容可以将这个极不平滑的直流电转化为一个电流波动不会很大的平滑的直流电。此直流电输入至对称比较桥单元，对称比较桥将输出一个直流电压。输出的直流电压再输入到由 R_5 和 C_1 构成的积分电路（可提高此系统的稳定性）。而后电流触发 T_1 三极管，三极管导通，移相触发单元的外接电源将对电容 C_2 进行充电，充电后，电容 C_2 又触发 T_2 场效应管使其导通，导通后再触发 T_3 三极管使其导通。 T_3 导通时移相触发单元的外接电源会流经脉冲变压器的一次绕组，它的一次绕组两端产生出电压。经脉冲变压器变压后，对应的二次绕组产生电压。将此电压信号输入晶闸管的控制极，控制晶闸管的导通与关断。晶闸管导通后两相零式励磁单元将对励磁线圈供电，使励磁线圈产生电流。本励磁系统又采取双绕组电抗分流自励恒压系统中电抗分流的方法，在发电机主绕组后端串联一个电抗器，使发电机主绕组后端一部分的电流导入大地，一部分的电流经整流后流入励磁线圈。

3.2 励磁调节器原理

在发电机运行中，负荷电流和功率因数会变化，所以发电机机端电压就会偏离额定值^[9]。未安装励磁系统时，就需要工作人员调节 R_C 来保持发电机端电压稳定，其整个调节过程如下：

当工作人员观察到机端电压低于额定值（励磁系统调节器测量到偏差电压），就会去操作电阻 R_C ，减少其电阻大小（励磁系统调节器把偏差信号放大并执行调节），电阻减小会增大励磁电流，机端电压会逐渐上升到额定值。工作人员进行“测量偏差”分析是依据发电机正常运行时的额定值进行的，以这个额定值作对比，当发电机端电压达到额定值（说明偏差等于零），就停止调整电阻 R_C 。

上面所阐述的人工调整 R_C 的过程，当发电机对应的机端电压为额定值 U_{GN} ，励磁电流为额定值 I_{GN} 。当发电机端电压 $U_G > U_{GN}$ 时，就需要工作人员

手动减少励磁电流，发电机端电压 U_G 也会减少；当 $U_G < U_{GN}$ 时，发电机的端电压 U_G 随着励磁电流的增大而增大。

如果以上通过工作人员调节实现的测量功能、放大功能和执行功能利用励磁调节器来完成，同样能维持发电机机端电压接近额定电压，就构成如图 5 所示的闭环调节回路。

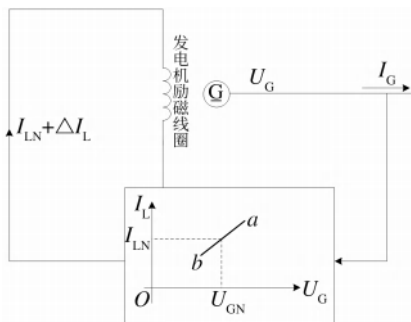


图 5 闭环调节示意图

3.3 励磁调节器的构成

励磁调节器作为一个以电压为被控量的负反馈调节系统，是励磁系统的一部分，它主要起着调节作用。励磁调节器包括变换单元、测量单元、综合比较单元、放大单元和执行单元，这些单元的作用分别如下：

- 1) 变换单元，将从机端电压互感来的信号变换成可反映发电机端电压、发电机三相电流的综合电信号。
- 2) 测量单元，将综合电信号进行滤波、整流和检测，再输出一个加入了系数与发电机的端电压 U_G 成正比的直流电压 KU_G ^[9]。
- 3) 综合比较单元，将整定电压 U_Z 与 KU_G 比较，得出偏差电压 ΔU ，即 $\Delta U = U_Z - KU_G$ 。当机端电压偏高时， ΔU 应当是负值；当机端电压偏低时， ΔU 应当是正值。
- 4) 放大单元，放大单元就是按照 ΔU 的大小和正负进行放大，输出电压 U_K 。
- 5) 执行单元，按照输出电压 U_K 驱动执行机构，

调节励磁电流。当 ΔU 为负值时，减少励磁，减小发电机电压； ΔU 为正值时，增加励磁，提高发电机电压， ΔU 称为反馈量。

3.4 两相零式电抗分流励磁系统中的整流电路

二极管整流电路的使用功率比较大，电压比较高，故其功率输出整流电路大多数采用的是三相桥式接线。使用整流桥可将三相电转化为直流电。

4 可控两相零式电抗分流发电机励磁系统的 Matlab 建模

打开 Matlab 软件，在 Matlab 界面里打开 Simulink 模块，打开后选取 library browser，找到 Simcape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Machines 这一路径，即可选择

可控两相零式电抗分流励磁系统所需要的同步发电机模型^[10]。搭建的励磁系统的发电机选用 Synchronous Machine pu Fundamental 模型。

5 可控两相零式电抗分流励磁系统仿真分析

5.1 发电机励磁系统仿真

首先打开 Matlab 的 Simulink 模块，选择已建立好的可控两相电抗分流励磁系统的数学模型打开，选择仿真时间为 10s，仿真步长选择 Auto，设置断路器模块在 1s 时刻由原来的分闸状态变化到合闸状态。点击运行按钮，等待至仿真结束后，单击 Scopes 示波器模块。然后点击 BSM（取自同步发电机输出模块的 ABC 三相电压与电流）示波器，其波形如图 6 所示。

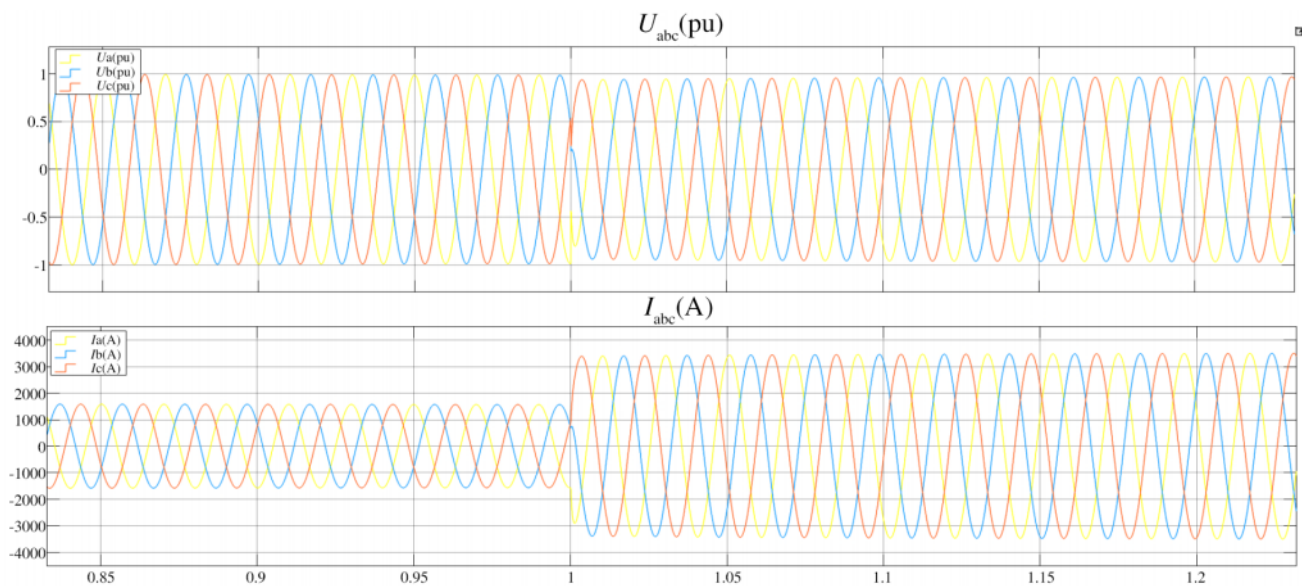


图 6 发电机出线电压 (标么值) 与电流 (A)

由此波形可知，可控两相零式电抗分流励磁系统^[12]可以保证发电机空载运行和在发电机不并网情况下的正常运行。

5.2 同步发电机并网运行仿真分析

首先搭建发电机的仿真数学模型，在发电机的主绕组后端串接一个电抗器对主绕组后端出来的电流进行分流，一部分电流经过电抗器导入大地，另一部分电流流入三相整流桥。并联一个电容可将三相整流桥

的输出电流转变为平滑的直流电，其后此电流流入励磁单元，使发电机励磁线圈产生磁场，从而使发电机产生三相电流。发电机励磁电流接入励磁单元可实现闭环调节励磁电流，使励磁电流大小稳定在给定范围内^[11]。其发出的400V相电压经变压器变压后A、B、C相合成了励磁线圈的正极电压，其中性线电压提供励磁线圈的负极电压。

励磁电压幅值最终会稳定，说明可控两相零式电抗分流系统的可调节励磁电压使励磁电压幅值达到稳定值。然后在可控两相零式电抗分流励磁系统发电机的三相电输出端并联一个三相电网模块 Three-phase Source，设置电网频率为50Hz，线电压为400V。

在发电机并网后，点击运行按钮，等待仿真结束，仿真结束，此时发电机的励磁电流、励磁电压、有功功率和转速分别如图7所示。

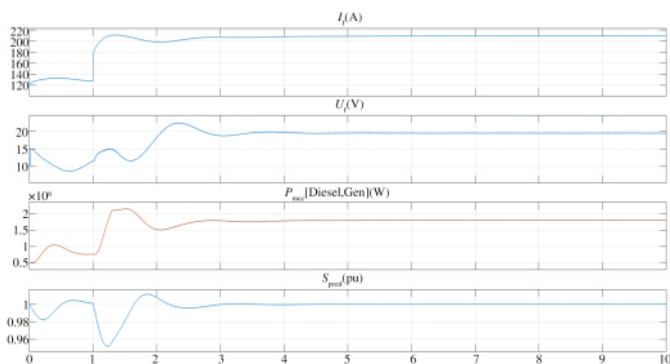


图7 发电机励磁电流、励磁电压、输出功率、转速(标么制)

经仿真后发现，发电机与400V并网后仍能稳定运行，并在3s左右的时刻电压与电流就已恢复额定水平，励磁电流、励磁电压、有功功率和转速都达到了稳定值。可见可控两相零式电抗分流励磁系统已解决并网运行困难的问题。

5.3 可控两相零式电抗分流励磁系统仿真结果指标表

对可控两相零式电抗分流励磁系统进行仿真后得到指标表如表1和表2所示。

表1 励磁系统性能指标表

性能指标	双绕组电抗分流励磁系统	两相零式励磁系统	可控两相零式电抗分流励磁系统
与电网并联情况	并网困难	能并网	能并网
频率补偿	差	好	好
主控回路故障	不能运行	能运行	能运行
触发回路故障	无	不能运行	能运行

表2 励磁系统经济指标表

经济指标	双绕组电抗分流励磁系统	两相零式励磁系统	可控两相零式电抗分流励磁系统
电抗器	有(较大)	无	有(较小)
附加绕组	有	无	无
晶闸管	无	有(较大)	有(较小)
触发回路	无	有	有

从性能指标上来看，可控两相零式电抗分流励磁系统解决了双绕组电抗分流励磁系统与两相零式励磁系统存在的问题。

从经济指标上来看可控两相零式电抗分流系统也是最为经济的。

6 结束语

经过 Matlab 软件仿真后可发现可控两相零式电抗分流励磁系统比双绕组电抗分流励磁系统或可控两相零式励磁系统更好的励磁系统，装设此种励磁系统的发电机可确保发电机组的并网运行。采用可控两相零式电抗分流励磁系统的发电机，还有性能和经济上的优点，这是单独采用双绕组电抗分流励磁系统，或者单独采用两相零式励磁系统达不到的，是一种更好的励磁系统。采用可控两相零式电抗分流励磁系统，解决了双绕组电抗分流励磁系统并网困难的问题，也提高了各方面的性能。

参考文献

- [1] 沈文平. 同步发电机励磁控制系统研究 [J]. 机电信息, 2009 (36): 32.
- [2] 祁正栋, 周小鸿, 陈国平. 农村小型水电站励磁系统改造设计 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47 (8): 82-86.
- [3] 宋福海, 林其煌. 扩大单元接线方式下发电机励磁系统调差特性分析 [J]. 福建电力与电工, 2002(1): 1-5.
- [4] 陈延云, 蔡培, 王锐, 等. 不同系统接线方式下电压调差率的整定计算 [J]. 电气技术, 2015 (1): 71-74.
- [5] 马士英, 曹斌勇. 自并励同步发电机机端短路电流及其保护方式 [J]. 湖南电力, 2002 (5): 8-10.
- [6] Zhong Zheyang. Modeling of a voltage regulator for a synchronous generator: simulation, implementation and validation experiment [D]. South China University of Technology, 2015.
- [7] 刘伟. 浅谈励磁系统的作用及其要求 [J]. 中国电力教育, 2008 (S1): 13-16.
- [8] 王言徐. 发电机励磁系统建模 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
- [9] 王德. 谐波励磁系统的运行原理及故障分析 [J]. 电气工程应用, 1987 (4): 7-13.
- [10] 周小鸿, 祁正栋, 陈国平. 基于可控两相零式电抗分流励磁系统解决农村小水电站稳定并网方法 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (2): 175-178.
- [11] 孔悦. 任凭风浪起——记天津电气传动设计研究所 [J]. 科技潮, 1994 (1): 49-50.
- [12] 吴斌. 同步发电机励磁控制系统的仿真研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2007.

(收稿日期: 2024-09-29)