

# 自并励励磁系统灭磁容量计算与仿真分析

杨玲,许其品,朱宏超,谢燕军,林元飞,李厚俊  
(国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 210006)

**摘要:**为保证发电机发生短路等故障时,灭磁系统能够安全、迅速地给发电机灭磁,并将发电机转子绕组中的磁场能量消耗在灭磁回路耗能元件中,文中通过求解同步发电机的五绕组微分方程并计及饱和,采用 Matlab 编写程序模拟空载误强励、负载误强励、负载三相金属性短路等工况下的灭磁过程,以某电厂参数进行仿真分析计算,并对照实际详细数学分析说明仿真计算结果精确可靠,可用于各种机组的灭磁容量设计,并为未来智能化励磁灭磁系统分析提供技术支持。

**关键词:**五绕组微分方程;空载误强励;负载误强励;三相短路;灭磁容量

**中图分类号:**TM 34 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)04-0031-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230406

## Calculation and Simulation Analysis of De-excitation Capacity of Self-shunt Excitation System

YANG Ling, XU Qipin, ZHU Hongchao, XIE Yanjun, LIN Yuanfei, Li Houjun  
(NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to ensure the safe and quick de-excitation of generator by de-excitation system in case of short circuit and other faults of generator, and consume the magnetic field energy in rotor winding of generator in energy consuming elements of de-excitation circuit, the five-winding differential equation of synchronous generator is solved considering saturation, and the de-excitation processes under no-load false forced excitation, load false forced excitation and load three-phase metallic short circuit are simulated by Matlab. Taking the parameters of a power plant for simulation and calculation, the results are verified to be accurate and reliable according to actual and detailed mathematic analysis, which can be used to design de-excitation capacity of various units and provide technical support for the analysis of intelligent de-excitation system in the future.

**Key words:** five-winding differential equation; no-load false forced excitation; load false forced excitation; three-phase short circuit; de-excitation capacity

## 0 引言

同步发电机在运行中,当发生定子绕组匝间短路、定子绕组相间短路、定子接地短路等故障时,继电保护装置就快速地将发电机从系统中切除,但发电机的感应电势却依然存在,继续供给励磁电流,故将会发生导线的熔化和绝缘材料的烧损,甚至烧坏铁芯。因此,当发生上述发电机故障时,在继电保护动作将发电机断路器跳开的同时,还应迅速地给发电机灭磁。灭磁系统的作用就是当发电机内部与外

部发生上述事故时迅速切断发电机的励磁,将发电机转子绕组中的磁场能量快速消耗在灭磁回路耗能元件中。

现行标准<sup>[1]</sup>规定了灭磁容量的计算工况,包括空载误强励、负载误强励及机端三相金属性短路。文献[2]根据 SiC 电阻的伏安特性及灭磁回路拓扑结构,在理想情况下对励磁电流与灭磁时间的函数关系进行了推导并给出了 SiC 电阻耗能公式,同时分别对空载误强励和机端三相短路两种极端灭磁工况的灭磁电阻耗能作出了理论分析。文献[3]运用电力电子软开关技术实现快速灭磁,并利用储能元

件存储灭磁过程中的部分磁场能量。文献[4]增加了辅助逆变器的高新技术应用,同时对跨接器回路进行了改进,采用多重冗余触发电路电子跨接器。文献[5]提出了一种线性电阻与非线性电阻组合灭磁的方式。文献[6-7]通过 SIMULINK 工具的基本模块求解同步发电机的微分方程,从而进行灭磁仿真。

下面通过差分法求解同步发电机的五绕组微分方程,计及磁路饱和,利用 MATLAB 程序对灭磁系统进行精确仿真<sup>[8]</sup>,研究发电机空载误强励、负载误强励及机端三相金属性短路时的灭磁容量计算。

## 1 同步发电机 Park 方程

为准确模拟灭磁系统的工况,需要计及发电机转子的阻尼效应。对于凸极发电机而言,需要建立 5 个回路的方程,5 个回路分别为定子三相绕组的  $d$  轴分量、定子三相绕组的  $q$  轴分量、转子绕组、直轴( $d$  轴)阻尼绕组、交轴( $q$  轴)阻尼绕组。为方便分析,认为转子以同步转速旋转,转子角速度标么值为 1,则回路方程可表示为<sup>[10]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -r_i i_d + \dot{\psi}_d - \psi_q \\ U_q &= -r_i i_q + \dot{\psi}_q + \psi_d \\ U_f &= r_f i_f + \dot{\psi}_f \\ 0 &= r_D i_D + \dot{\psi}_D \\ 0 &= r_Q i_Q + \dot{\psi}_Q \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_q &= -x_q i_q + x_{aq} i_Q \\ \psi_f &= -x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_D &= -x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_D i_D \\ \psi_Q &= -x_{aq} i_q + x_Q i_Q \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $U_d$ 、 $U_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$  分别为定子绕组的  $d$ 、 $q$  轴电压、电流分量; $U_f$ 、 $i_f$  分别为磁场绕组的电压、电流; $i_D$ 、 $i_Q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴阻尼绕组的电流; $r$ 、 $r_f$ 、 $r_D$ 、 $r_Q$  分别为定子绕组、转子绕组、 $d$  轴阻尼绕组、 $q$  轴阻尼绕组的电阻; $x_d$ 、 $x_q$  分别为发电机的直轴、交轴同步电抗; $x_{ad}$ 、 $x_{aq}$  分别为发电机的直轴、交轴电枢反应电抗; $x_f$ 、 $x_D$ 、 $x_Q$  分别为励磁绕组、直轴阻尼绕组、交轴阻尼绕组的自电抗; $\psi$  为各绕组磁链; $\dot{\psi}$  为磁链对时间的导数  $d\psi/dt$ 。

灭磁时,磁场断路器断开,接入灭磁电阻,转子与灭磁电阻形成通路。灭磁时的电路方程<sup>[6]</sup>表示为

$$0 = i_f r_f + R i_f + \frac{d(L_{fs} + L_{ad}) i_f}{dt}$$

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{R i_f + i_f r_f}{L_{fs} + L_{ad}} \quad (3)$$

式中: $R$  为灭磁电阻,可以为线性电阻或非线性电阻,也可为组合电阻(非线性与线性组合或者其他组合),这里选取为非线性电阻,因此非线性电阻的电压降  $R i_f = C_R i_f^\beta$ ,  $C_R$  为非线性电阻位形系数,  $\beta$  为非线性电阻系数; $L_{fs}$  为磁场漏感,基本为常数; $L_{ad}$  为与定子磁链的主电感,受磁路饱和影响,是励磁电流的函数。由于回路电感变化不大,转子电阻较小,因此当灭磁初始电流一定时,转子电流变化率与  $R i_f$  有关,  $R i_f$  越大,变化率越大,即灭磁时的衰减速度越快。因此若想提高灭磁速度,需要  $R i_f$  尽可能地保持在最大值。

发电机的精确分析要求考虑磁路饱和效应对电机模型的影响。而为了节省材料,同步发电机运行在额定条件时,定子和转子就已经处于浅度饱和状态,因此励磁电流和励磁电压的计算需要考虑磁路饱和。

通过查询发电机空载特性饱和曲线,选取线性段数据 10 点及非线性段上 10 点,共 20 点,对数据进行二项式拟合,可根据实际情况增减,点数越多,拟合越准确。求解拟合后的方程找到饱和段与不饱和段的分叉点,令该点对应电流值为  $i_{point}$ ,将曲线分为线性段和非线性段,用式(4)表示。

$$U_0 = \begin{cases} L i_f & i_f \leq i_{point} \\ A i_f^2 + B i_f + C & i_f > i_{point} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L$  为动态电感; $U_0$  为饱和段与不饱和段分叉点对应的机端电压值; $A$ 、 $B$ 、 $C$  为拟合系数。

若没有发电机空载特性饱和曲线,那么空载特性可用通用表达式<sup>[7]</sup>表示为

$$U_0 = \begin{cases} 1.1 i_f & i_f \leq 0.823 \\ \frac{1.95 i_f}{0.95 + i_f} & i_f > 0.823 \end{cases} \quad (5)$$

## 2 灭磁仿真模型验证

以某水电站的参数为例进行仿真,主要参数见表1。

表1 机组参数

| 项目名称                           | 参数     | 项目名称                                      | 参数        |
|--------------------------------|--------|---|-----------|
| 额定功率/MW                        | 600    | 转子电阻/ $\Omega$                            | 0.125 4   |
| 额定电压/kV                        | 20     | 直轴瞬态短路时间常数 $T'_d$ /s                      | 3.031     |
| 额定电流/A                         | 19 245 | 直轴超瞬态短路时间常数 $T''_d$ /s                    | 0.099     |
| 额定功率因数(滞后) $\cos \Phi$         | 0.9    | 交轴超瞬态短路时间常数 $T''_q$ /s                    | 0.098     |
| 额定频率/Hz                        | 50     | 直轴瞬态开路时间常数 $T'_{d0}$ /s                   | 10.602    |
| 直轴同步电抗 $X_{du}$ (不饱和值)/(pu)    | 1.057  | 直轴超瞬态开路时间常数 $T''_{d0}$ /s                 | 0.135     |
| 直轴瞬变电抗 $X_{ds}$ (不饱和值)/(pu)    | 0.933  | 交轴超瞬态开路时间常数 $T''_{q0}$ /s                 | 0.102     |
| 直轴瞬变电抗 $X'_{du}$ (不饱和值)/(pu)   | 0.314  | 定子绕组短路时间常数 $T_a$ /s                       | 0.41      |
| 直轴瞬变电抗 $X'_{ds}$ (饱和值)/(pu)    | 0.295  | 定子漏抗 $X_{\sigma}$ /(pu)                   | 0.144     |
| 直轴超瞬变电抗 $X''_{du}$ (不饱和值)/(pu) | 0.233  | 定子绕组电阻 (75 $^{\circ}\text{C}$ )/ $\Omega$ | 0.001 118 |
| 直轴超瞬变电抗 $X''_{ds}$ (饱和值)/(pu)  | 0.221  | 励磁变副边电压/V                                 | 970.0     |
| 交轴同步电抗 $X_q$ (饱和值)/(pu)        | 0.700  | 灭磁电阻残压/V                                  | 1 700.0   |
| 交轴瞬变电抗 $X'_{qu}$ (不饱和值)/(pu)   | 0.745  | 空载励磁电流/A                                  | 1 728.5   |
| 交轴同步电抗 $X'_{qs}$ (饱和值)/(pu)    | 0.700  | 空载励磁电压/V                                  | 180.3     |
| 交轴超瞬变电抗 $X''_{qu}$ (不饱和值)/(pu) | 0.247  | 额定励磁电流/A                                  | 3 078.5   |
| 交轴超瞬变电抗 $X''_{qs}$ (饱和值)/(pu)  | 0.232  | 额定励磁电压/A                                  | 456.5     |

该电厂灭磁电阻采用碳化硅电阻,非线性系数  $\beta=0.39$ ,  $C_R=48.3$ 。根据 DL/T 294.4—2019《发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第4部分:灭磁容量计算》标准要求,发电机灭磁仿真的工况只考虑发电机空载误强励、负载误强励及机端三相金属性短路3种严重工况。一方面由于现场极少出现此3种工况,另一方面由于现场灭磁电压和灭磁电流的监测手段限制无有效数据进行对比,所以为验证模型的准确性,只有根据理论计算进行对比。

对同步发电机初始条件为空载态、定子三相突然短路进行数学分析<sup>[11]</sup>,此时励磁电流包含3个分量,见式(6):第一个分量是由励磁电压所产生的

稳态分量;第二个分量是以直轴瞬态短路时间常数  $T'_d$  衰减的非周期自由分量;第三个分量是以定子绕组短路时间常数  $T_a$  衰减的基频周期分量。

$$i_f \approx i_{f0} \left( 1 + \frac{X_d - X'_d}{X'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{X_d - X'_d}{X'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos t \right) \quad (6)$$

通过计算短路后励磁电流的第一个波峰值来对比公式与仿真模型。

1) 理论计算:式(6)中若转速不变,不考虑饱和及阻尼绕组,且认为短路瞬间时间  $t=0$ ,则励磁电流出现第一个波峰值的时间为 0.01 s,其稳态值  $i_{f0}=1729$  A,将表1中参数代入计算可得短路后励磁电流  $i_f$  第一个波峰值约为 10 538.8 A。

2) 仿真模型:同时改变计算模型的初始条件,不考虑饱和及阻尼绕组,仿真波形如图1所示,短路后 0.01 s 励磁电流达到第一个波峰,波峰值为 10 550 A,与理论计算值基本一致。因此可以认为所使用的模型具有较高的准确性。

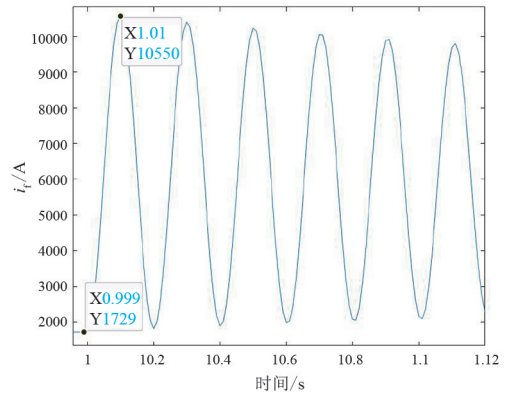


图1 空载三相短路灭磁仿真

## 3 各工况下的灭磁仿真分析

### 3.1 空载误强励工况

采用通用的饱和特性表达式进行仿真计算。当发电机运行在额定空载工况时,突然失控误强励,在机端电压达到 1.3 倍额定值后延时 0.300 s 跳灭磁断路器,同时将灭磁电阻接入灭磁回路进行灭磁。此时边界条件为定子电流  $d$ 、 $q$  轴分量为 0,  $q$  轴绕组磁链为 0, 无  $q$  轴阻尼绕组电流和磁链, 阻尼绕组电流为 0, 交轴绕组电流为 0。

空载时考虑阻尼绕组的条件下,  $i_d=i_q=0$ , 由于  $q$  轴电流为 0, 且  $q$  轴阻尼无外加电势, 因此  $i_q=0$ ,  $\psi_q=\psi'_q=0$ 。因此回路方程式(1)、式(2)变为:

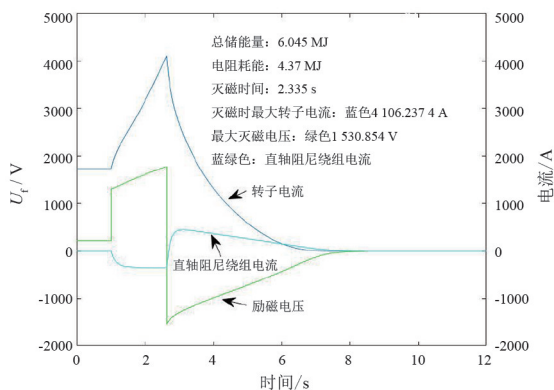
$$\left. \begin{aligned} U_d &= \dot{\psi}_d \\ U_q &= \psi_d \\ U_f &= r_f i_f + \dot{\psi}_f \\ 0 &= r_D i_D + \dot{\psi}_D \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= x_{ad} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_f &= x_{fd} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_D &= x_{ad} i_f + x_{Dd} i_D \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

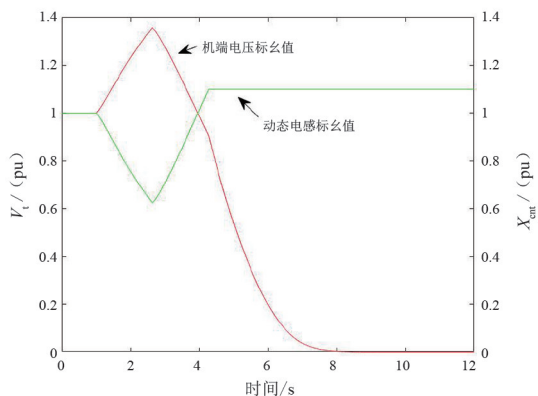
DL/T 294.4—2019 中要求的空载误强励灭磁容量计算工况为:对于凸极发电机,整流桥控制角为 $0^\circ$ ,发电机定子电压为 1.3 倍额定值,延时 0.300 s 跳磁场断路器<sup>[1]</sup>。经过仿真计算,结果如图 2 所示。由图 2(a) 显示:灭磁电阻耗能为 4.773 2 MJ,这里所指的灭磁时间是从空载额定励磁电流达到 10%空载额定励磁电流的时间,为 1.108 s;灭磁时最大转子电流为 4 106.24 A;最大灭磁电压为 1 645.77 V。由图 2(b) 可以看出,假设稳态时的动态电感标么值为 1,当发生误强励时,磁路饱和越来越大,对应动态电感变小,灭磁后动态电感逐渐恢复到不饱和值。

强励,由于发电机并列在网上,当电网比较强时可认为机端电压一直为额定电压,当电网较弱、机组较大时,需要考虑机端电压会升高的情况。因此判定条件为:在发电机定子电流达到热稳定极限、转子电流达到热稳定极限,跳灭磁断路器,同时将灭磁电阻接入灭磁回路进行灭磁;或机端电压达到 1.3 倍额定值后,延时 0.300 s 跳灭磁断路器,同时将灭磁电阻接入灭磁回路进行灭磁。发生负载误强励时需要考虑两种情况:机端电压不升高,此时灭磁时的容量相对较小,这里不再赘述;机端电压因误强励而升高时,需要考虑并网电抗的影响。负载误强励造成磁场断路器分断后,可以认为与空载灭磁一致。

DL/T 294.4—2019 中要求的负载误强励灭磁容量计算工况为:负载额定工况运行,励磁控制角突然变为 $0^\circ$ ,定子过电压保护或定子过负荷保护或转子过负荷保护动作分断磁场断路器<sup>[1]</sup>。对于凸极发电机,发电机定子电压达 1.3 倍额定值,延时 0.300 s 保护动作。经过仿真计算,结果如图 3 所示。由图 3(a) 显示,灭磁电阻耗能为 5.722 9 MJ,灭磁时间为 1.052 s,灭磁时最大转子电流为 8 984.46 A,最

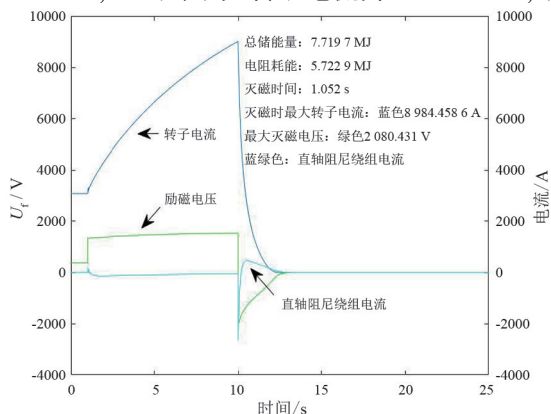


(a) 转子电流、励磁电压直轴阻尼绕组电流

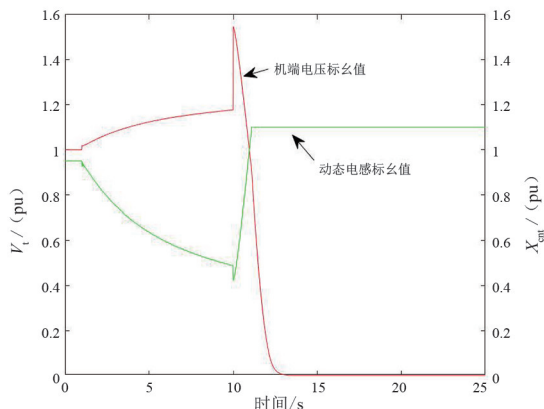


(b) 机端电压与动态电感

图 2 空载误强励灭磁仿真模型



(a) 转子电流、励磁电压直轴阻尼绕组电流



(b) 机端电压与动态电感

图 3 负载误强励灭磁仿真模型

### 3.2 负载误强励工况

当发电机运行在额定负载工况时,突然失控误

大灭磁电压为 2 080.43 V。由图 3(b)可以看出,当发生误强励时,磁路饱和越来越大,对应动态电感变小,灭磁后动态电感逐渐恢复到不饱和值。

并网断路器断开,发电机变为空载态,由于电枢反应突然消失,而励磁绕组的磁链不能跃变,转子中要感应出电流来抵制定子磁链的变化<sup>[9-11]</sup>,因而励磁电流将产生一个变化量使得励磁电流突然减小。由于空载时,  $U_d = \dot{\psi}_d$ , 即  $U_d$  与励磁电流和直轴阻尼绕组电流的变化量正相关,因此灭磁瞬间机端电压会产生一个跃变。

### 3.3 负载三相短路工况

发电机负载工况时发生三相金属短路,将造成机端电压为 0,对于自并励系统而言,励磁电压也为 0。机端短路分为发电机内部短路及并网断路器外短路,两者区别在于:当发电机内部短路后,故障点无法切除,灭磁时相当于负载态;当发生并网断路器外短路后,断路器断开即可切除故障点,灭磁时已变为空载态。

额定负载下,发生定子短路时的物理过程:突然短路时,定子基频电流突然增大,电枢反应磁通也突然增加;励磁绕组和阻尼绕组为了保持磁链不变,都要感生出自由直流,由它产生磁通来抵消电枢反应磁通的增量。

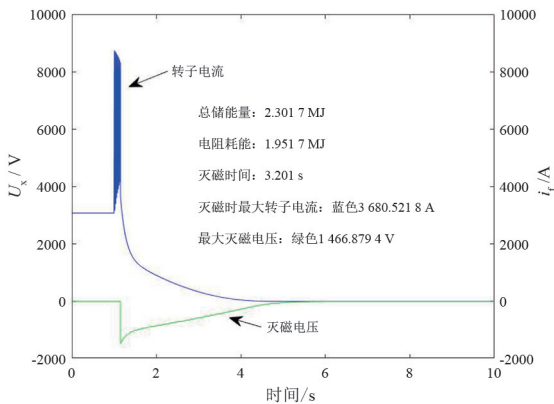
DL/T 294.4—2019 中要求机端三相金属性短路的灭磁容量计算条件为:发电机额定工况下机端三相金属性短路,延时 0.150 s 分磁场断路器灭磁<sup>[1]</sup>。

#### 3.3.1 短路故障点切除

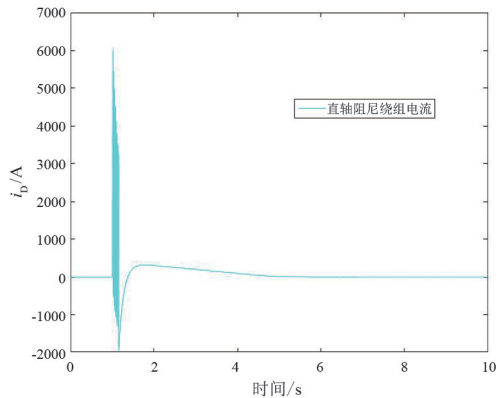
模拟该机组正常额定负载运行,1.000 s 时机端发生三相金属性短路,故障点位于并网断路器网侧。1.150 s 保护动作,跳并网断路器同时联跳励磁系统磁场断路器,故障点切除,励磁系统磁场断路器断开,灭磁电阻投入,开始灭磁。仿真波形如图 4 所示。

从图 4(a)中可以看出:短路瞬间,转子电流从额定 3078 A 增至 8737 A,然后保护动作,并网断路器断开,发电机变为空载态;由于电枢反应突然消失,而励磁绕组的磁链不能跃变,转子中要感应出电流来抵制定子磁链的变化<sup>[9-11]</sup>,因而励磁电流将产生一个变化量使得励磁电流突然减小;短路 0.150 s 后灭磁电阻投入,此时最大转子电流为 3 680.5 A,灭磁电压最大为 1 466.88 V,灭磁电阻耗能为 1.951 7 MJ。图 4(b)为直轴阻尼绕组电流波形,由于阻尼绕组在稳态时不起作用,电流为 0,而短路时,转子与旋转

磁场有相对运动,阻尼绕组产生感应电流,该电流与旋转磁场相互作用,产生阻止转子相对旋转磁场运行的转矩,随着灭磁电阻投入,转子电流下降,阻尼绕组电流开始上升,体现出阻尼作用。



(a) 转子电流与灭磁电压



(b) 直轴阻尼绕组电流

图 4 短路故障点切除灭磁仿真波形

#### 3.3.2 短路故障点不切除

模拟该机组正常额定负载运行,1.000 s 时机端发生三相短路,故障点位于发电机侧。1.150 s 时保护动作,跳并网断路器同时联跳励磁系统磁场断路器,但由于故障点在发电机侧而无法切除,因此灭磁时短路点仍然存在,励磁系统磁场断路器断开,灭磁电阻投入,开始灭磁。仿真波形如图 5 所示。

从图 5(a)中可以看出:短路瞬间,转子电流从额定 3078 A 增至 8876 A,然后保护动作,并网断路器断开,但故障点不能切除;短路 0.150 s 后灭磁电阻投入,由于定子继续短路,定子在转子中感应的周期电流一直存在,此时最大转子电流为 8402 A,灭磁电压最大为 2024 V,灭磁电阻耗能为 6.512 9 MJ,由于定、转子耦合存在,定子绕组的能量会不断传递到转子,从而使消耗在灭磁电阻上的能量大大增加,同时定子电阻也在消耗能量;随着转子电流的减小,定子电流也在减小,最终都趋于 0。图 5(b)为直轴

阻尼绕组电流波形,短路瞬间,阻尼绕组最大电流达 6000 A 左右,体现出阻尼作用。

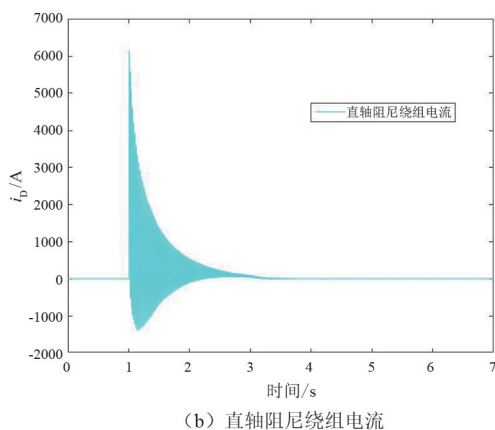
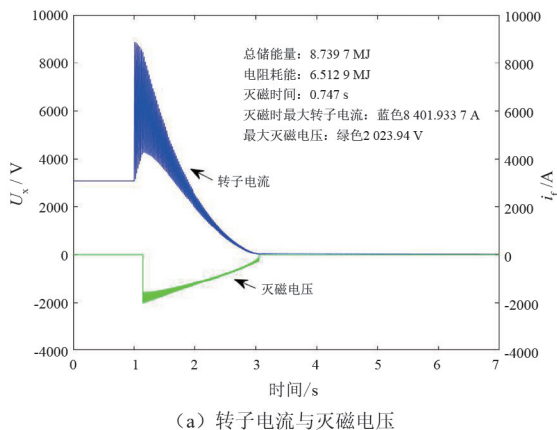


图 5 短路故障点不切除灭磁仿真波形

## 4 理论计算

上述 3 种工况下的仿真计算结果显示,负载三相金属性短路工况下灭磁电阻容量最大为 6.513 MJ。

根据 DL/T 294.4—2019 第 4.5 节要求,当参数不全时,灭磁电阻容量估算的计算公式<sup>[1]</sup>为

$$E = \frac{1}{2} K_r K_s T_d' r_f (K_{dc} i_{fN})^2 \quad (9)$$

式中: $E$  为灭磁电阻容量, J;  $K_r$  为灭磁电阻容量与转子磁场能量的比例,可取 0.6~0.7;  $K_s$  为饱和系数,凸极机可取 0.6~0.7,隐极机可取 0.4~0.6;  $T_d'$  为发电机直轴短路暂态时间常数, s;  $r_f$  为发电机励磁绕组热态电阻值,可取 75 °C 时的电阻值,  $\Omega$ ;  $K_{dc}$  为电流倍数,可取 3;  $i_{fN}$  为发电机额定负载励磁电流, A。

将机组参数代入式(8)计算可得: $E=7.942$  MJ。

由此可见,灭磁电阻容量估算值偏大,当现场参数缺失时,可参考估算值进行选择。

## 5 结论

上面通过求解同步发电机的五绕组微分方程,计及饱和,采用 Matlab 编写程序模拟空载误强励、负载误强励、负载三相金属性短路等工况下的灭磁过程,以某电厂参数进行仿真分析计算,对比说明仿真计算结果精确可靠,可用于各种机组的灭磁容量设计,并为未来智能化励磁灭磁系统分析提供技术支持。

### 参考文献

- [1] 电力行业水电站自动化标准化技术委员会. 发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第 4 部分: 灭磁容量计算: DL/T 294.4—2019 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [2] 王帅, 吴方元. 大型核电机组 SiC 灭磁电阻容量的选择[J]. 发电设备, 2018, 32(1): 19-23.
- [3] 王悦旸, 谭亲跃, 润子玉, 等. 基于储能电路的大型发电机组灭磁方式优化[J]. 大电机技术, 2021(6): 68-74.
- [4] 罗旺旺, 郭文峰, 罗泽文, 等. 某大型水电站灭磁回路及控制技术分析[J]. 水电与新能源, 2021, 35(6): 26-30.
- [5] 许其品, 孙素娟, 程小勇. 大型发电机组灭磁方式[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 70-73.
- [6] 陈贤明, 王伟, 吕宏水, 等. 1000 MW 汽轮发电机三相短路后灭磁仿真[J]. 电力设备, 2008, 9(11): 24-28.
- [7] 陈贤明, 朱晓东, 王伟, 等. 水轮发电机突然三相短路后灭磁研究[J]. 水电厂自动化, 2006, 27(3): 38-45.
- [8] 许其品, 杨铭, 徐蓉. 汽轮发电机灭磁电阻选择[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 125-129.
- [9] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 334-375.
- [10] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [11] 汤蕴缪. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [12] 吴龙. 发电机励磁设备及运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

### 作者简介:

杨玲(1988),女,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制工作;

许其品(1967),男,硕士,研究员级高级工程师,从事励磁系统控制工作;

朱宏超(1981),男,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制工作。

(收稿日期:2022-08-02)