双凸极电励磁发电机系统非奇异终端滑模控制器的设计与仿真

戴卫力,丁 骏,田 浩,费峻涛

(河海大学 物联网工程学院 江苏省输配电装备技术重点实验室,江苏 常州 213022)

摘要:针对双凸极电励磁发电机调压系统,提出了一种非奇异终端滑模控制的调压控制策略。介绍了双凸极电励磁发电机的结构,并构建了数学模型。在此基础上,详细分析了基于非奇异终端滑模控制的调压器工作原理,给出了相应的滑模面方程与滑模控制律。通过李雅普诺夫稳定性方程和固定 PWM 控制载波交截等限制条件,给出了控制律系数的计算选取方法。基于电磁有限元瞬态分析技术与控制电路构建了"场-路"联合仿真系统,并对发电机的稳态与动态运行性能进行了仿真,结果表明基于非奇异终端滑模控制的双凸极电励磁发电机调压系统具有良好的稳态性能和优良的动态特性,具有输出电压静差和纹波小、动态恢复时间短和动态输出电压变化小的优越性能。

关键词:发电机;双凸极电励磁发电机;调压器;非奇异终端滑模控制;滑模控制;"场-路"联合仿真

中图分类号:TM 31 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.020

0 引言

从 20 世纪 90 年代美国电机专家 T. A. Lipo 提出双凸极电机(DSM)[1]至今,国内外许多专家与学者对不同激磁方式与磁路结构的 DSM 进行了电磁特性[2-3]、发电[4]与电动控制[5]等方面的研究,并使其在飞机起动/发电系统[6]、电动汽车驱动[7]及风力发电系统[8]等领域得到应用。在不同励磁方式的 DSM 中,由于电励磁和混合励磁 DSM 装有励磁绕组,励磁电流调节方便,非常适合作发电机使用。这类发电机用于发电系统时,无需检测发电机转子位置信号,只需外接三相整流桥即可输出直流电压[9]。同时,通过加装小功率的励磁调节器,调节励磁电流就可实现发电调压,且当发电机遇到故障时,只需关闭励磁调节器的功率开关就能实现对发电机的灭磁。

早期,双凸极发电系统中的励磁调节器采用的是单输出电压反馈控制,并不能使发电机获得良好的动态性能。后来,有学者提出在输出电压反馈控制的基础上增加励磁电流前馈补偿环节(简称为 VFECF 控制)对输出电压进行补偿,在双凸极电励磁发电机(DSEG)和双凸极混合励磁发电机[10](DSHEG)电压调节系统中取得了较好的效果,改善了发电机性能。与此同时,文献[11]还提出了在单输出电压反馈环的基础上增加负载电流前馈进行补偿(简称为 LCFC 控制),以此有效降低发电机在瞬态过程中的输出电压波动;此后,文献[12]又在 LCFC 控制的基础上引入了非线性的 PI 调节控制,改善了发电机的动态性能。随后,又有学者提出了由发电机输出电压、励磁电流、电压频率以及负载电流构成的多路闭环反馈控制调压系统[13],尽管这种控制策略能有效地改善发电机的动态性能,但控制元件和参数的选取变得极为复杂。

近年来,非线性控制理论极大地促进了发电机控制领域的发展。特别是滑模变结构控制,由于具有强鲁棒性、快速响应及良好的环境适应性等优点而在直流电机[14]、异步感应电机[15]、双馈感应发电机[16]、永磁同步电机[17-18]及开关磁阻电机[19]的控制和状态观测器[20]中得到了广泛应用。本文基于 DSEG 调压系统,提出了固定开关频率的非奇异终端滑模(NTSM)控制励磁调压器,实现了励磁电流的快速调节,提高了系统的稳定性和动态响应。文中基于 DSEG 数学模型和李雅普诺夫稳定性方程,建立了调压器的开关滑模轨迹方程,详细讲述了其工作原理,并给出了滑模系数的选取原则和控制律的实现方法。最后,基于有限元分析建立了发电系统的"场-路"联合仿真模型,进行了 NTSM 调压控制下的稳态和动态性能仿真,验证了理论分析的正确性和可行性。

1 DSEG 调压控制系统

图 1 所示 DSEG 调压系统由 DSEG、三相整流桥和励磁调节器三部分组成。其中,三相整流桥与 DSEG 三相绕组相连,将发电机交流电压整成直流电

收稿日期:2014-04-18;**修回日期**:2015-01-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207043);江苏省自然科学基金资助项目(BK2012150);研究生创新研究项目(XZX/13B002-04);河海大学创新人才计划资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207043),the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK2012150),the Innovation Project of Graduate Students(XZX/13B002-04) and the Outstanding Innovative Talents Plan of Hohai University

压;而励磁调节器中,V_{T1} 和 V_{T2} 为 MOSFET 或 IGBT 等全控型功率器件。正常情况下,V_{T1} 导通,V_{T2} 采用 PWM 控制以调节励磁电流,从而实现发电调压。

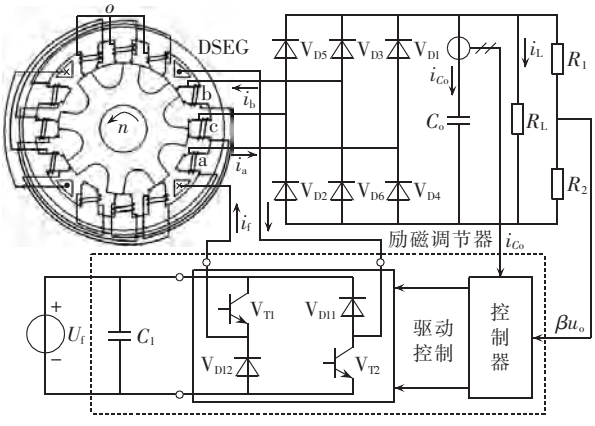


图 1 DSEG 调压系统

Fig.1 Voltage regulation system of DSEG

1.1 DSEG

图 1 所示 12/8 极 DSEG 的定、转子均为凸极结构,定、转子极弧相等。每个定子齿上都装有集中绕组,且每隔 90° 机械角的定子绕组相互串联构成一相;转子上无绕组,无铜损。电机 a、b、c 三相绕组见图中定义。图示“×”代表励磁电流流入;“·”代表励磁电流流出。相应的电机结构与电气参数如下:定子外径为 172 mm,转子外径为 110.9 mm,定子内径为 111.4 mm,转子内径为 40 mm,定子轭高为 10.7 mm,转子轭高为 16.2 mm,定子齿高为 19.6 mm,转子齿高为 19.25 mm,定子极弧为 15°,转子极弧为 15°,定、转子硅钢材料选用 1J22,电机轴长为 60 mm,输出直流电压为 28.5 V,额定负载电流为 200 A,励磁绕组串联匝数为 60×4,每相绕组串联匝数为 2×4。

当 DSEG 相绕组有电流流过时,a、b、c 各相绕组和励磁绕组中会产生磁链,可表示为:

$$\boldsymbol{\psi}=[\psi_a,\psi_b,\psi_c,\psi_f]^T \tag{1}$$

电机相绕组中的磁链与电机转子位置和绕组电流大小有关。当转子位置和绕组电流发生变化时,相磁链就会发生变化,产生感生电动势,可表示为:

$$\boldsymbol{E}=-\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}}{\mathrm{d}\theta}\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}-\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}}{\mathrm{d}\boldsymbol{I}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{e}-\boldsymbol{L}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

由上式可看出,感生电动势由两部分组成,分别为电机转子位置所决定的旋转电动势(也称相电势)和由电流变化引起的变压器电动势。

发电机各绕组端电压可表示为:

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{e}-\boldsymbol{RI} \tag{3}$$

其中,$\boldsymbol{e}=[e_a,e_b,e_c,e_f]^T$,为 a、b、c 各相绕组和励磁绕组的电势;$\boldsymbol{I}=[i_a,i_b,i_c,i_f]^T$,为发电机各绕组相电流;$\boldsymbol{u}=[u_a,u_b,u_c,u_f]^T$,为发电机各绕组端电压;$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}L_a & L_{ab} & L_{ac} & L_{af}\\ L_{ba} & L_b & L_{bc} & L_{bf}\\ L_{ca} & L_{cb} & L_c & L_{cf}\\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_f\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}R_a & 0 & 0 & 0\\ 0 & R_b & 0 & 0\\ 0 & 0 & R_c & 0\\ 0 & 0 & 0 & R_f\end{bmatrix}$,分别为 DSEG 各绕组的自感和互感构成的电感矩阵和发电机各相绕组电阻构成的电阻矩阵。

1.2 电压调节器

励磁电压调节器由励磁变换器和控制器构成。图 1 所示励磁变换器由 2 个功率开关管和 2 个续流二极管构成。其中,功率管 V_{T1} 在正常工作时处于导通状态,而功率管 V_{T2} 为 PWM 控制。当发电机出现故障导致发电机输出电压突变时,同时关闭功率管 V_{T1} 与 V_{T2},可使励磁电流急剧下降,从而使发电机实现灭磁。图中控制器可为数字控制也可为模拟控制。采用数字控制器可通过程序产生相应的功率管驱动信号,实现既定的调压控制策略。

2 NTSM 控制工作原理

为便于对 NTSM 控制的调压原理进行阐述并设定滑模控制律,可做如下假设:DSEG 工作在发电模式,且此时 V_{D1} 和 V_{D6} 处于导通状态,如图 1 所示。则输出电压误差 x_1、电压误差的微分 x_2 可表示为:

$$x_1=U_r-\beta u_o \tag{4}$$

$$x_2=\dot{x}_1=-\beta\frac{\mathrm{d}u_o}{\mathrm{d}t}=-\frac{\beta}{C_o}i_{Co}=-\frac{\beta}{C_o}\left(i_a-\frac{u_o}{R_L}\right) \tag{5}$$

其中,U_r 为参考电压;u_o 为发电机输出电压;β 为输出电压比例系数;i_a 为流过 a 相绕组的电流;i_{Co} 为流经滤波电容的电流;R_L 为负载电阻阻值。

根据图 1 所示电路工作模态,忽略电阻压降,则可得如下方程:

$$u_a=e_a-L_a\frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t}-L_{ab}\frac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

$$u_b=e_b-L_b\frac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t}-L_{ba}\frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

$$u_o=u_a-u_b \tag{8}$$

$$i_a=-i_b \tag{9}$$

由式(6)—(9),并考虑 $L_{ab}=L_{ba}$ 可得:

$$u_o=e_{ab}-(L_a+L_b-2L_{ab})\frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

其中,e_{ab} 为发电机 a、b 相绕组间的线电势。

对式(10)进行积分,可得电流 i_a:

$$i_a=\int\frac{e_{ab}-u_o}{L_a+L_b-2L_{ab}}\mathrm{d}t \tag{11}$$

将式(11)代入式(5),可得:

$$x_2=-\frac{\beta}{C_o}\left(\int\frac{e_{ab}-u_o}{L_a+L_b-2L_{ab}}\mathrm{d}t-\frac{u_o}{R_L}\right) \tag{12}$$

对式(4)、(12)分别求导,可得:

$$\dot{x}_1=-\beta\frac{\mathrm{d}u_o}{\mathrm{d}t}=x_2 \tag{13}$$

$$\dot{x}_2=-\frac{\beta}{C_o}\left(\frac{e_{ab}-u_o}{L_a+L_b-2L_{ab}}-\frac{1}{C_oR_L}i_{Co}\right) \tag{14}$$

由式(13)、(14),可得如下状态方程组:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ \dfrac{-1}{C_oL} & \dfrac{-1}{C_oR_L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{-\beta e_{ab}}{C_oL}\end{bmatrix}u+\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{U_r}{C_oL}\end{bmatrix} \tag{15}$$

其中,$L=L_a+L_b-2L_{ab}$;u 为调压器功率开关管 V_{T2} 的控制律。

假设二阶不确定非线性动态系统由下式表示:

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \dot{x}_2=f(\boldsymbol{x})+g(\boldsymbol{x})+b(\boldsymbol{x})u\end{cases} \tag{16}$$

其中,$\boldsymbol{x}=[x_1,x_2]^{\mathrm{T}}$;$b(\boldsymbol{x})\neq0$;$g(\boldsymbol{x})$代表不确定性及外部干扰。

若设计如下 NTSM 面:

$$S=x_2+\alpha(\mathrm{e}^{x_1}-1) \tag{17}$$

其中,α 为滑模系数,一般 $\alpha>0$。

根据此 NTSM 面,可设计如下控制律:

$$u=-b^{-1}(\boldsymbol{x})[f(\boldsymbol{x})+g(\boldsymbol{x})+\alpha x_2\mathrm{e}^{x_1}+K\,\mathrm{sgn}(S)] \tag{18}$$

其中,$\mathrm{sgn}(S)=|S|/S$。

若系统稳定,由李雅普诺夫稳定性条件,有:

$$\lim_{S\to0}S\dot{S}<0 \tag{19}$$

由式(17)可得$\dot{S}$为:

$$\dot{S}=\dot{x}_2+\alpha\dot{x}_1\mathrm{e}^{x_1}=f(\boldsymbol{x})+g(\boldsymbol{x})+b(\boldsymbol{x})u+\alpha x_2\mathrm{e}^{x_1} \tag{20}$$

将式(18)代入式(20)中,可以得到:

$$\dot{S}=-K\,\mathrm{sgn}(S) \tag{21}$$

因而有:

$$S\dot{S}=-K|S| \tag{22}$$

通过式(22)可以看出,只要系数 $K>0$,系统就能满足李雅普诺夫方程的稳定性条件,即系统稳定。

对比式(15)与(16),可得:

$$f(\boldsymbol{x})=-x_1/(C_oL)-x_2/(C_oR_L) \tag{23}$$

$$g(\boldsymbol{x})=U_r/(C_oL) \tag{24}$$

$$b(\boldsymbol{x})=-\beta e_{ab}/(C_oL) \tag{25}$$

将式(23)—(25)代入式(18)中,即可得到控制律:

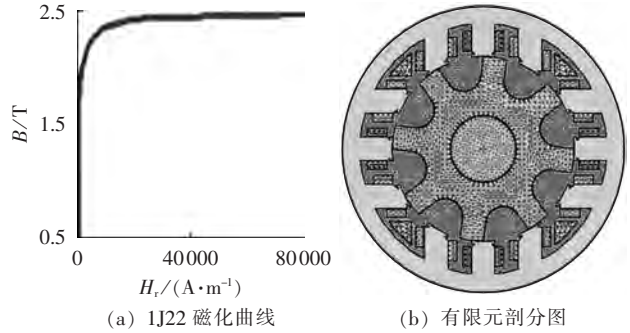
$$u=-\frac{C_oL}{\beta e_{ab}}\left[\frac{x_1}{C_oL}+\frac{x_2}{C_oR_L}-\frac{U_r}{C_oL}-\alpha x_2\,\mathrm{e}^{x_1}-K\,\mathrm{sgn}(S)\right] \tag{26}$$

其中,需要注意的是系数 $K>0$。

3 系统仿真建模与结果

为验证上述滑模控制理论分析的正确性,可在图2所示 DSEG 有限元分析模型的基础上,通过增加发电机主功率电路、电压调节器和相应的控制逻辑电路,建立如图3所示的 DSEG 发电调压系统"场-路"联合仿真模型。

考虑到实际发电系统参数(电感 $L=50\ \mu\mathrm{H}$,滤波电容 $C_o=40\ \mathrm{mF}$,滑模系数 $\alpha=1\,000$,$\beta=0.067$,$e_{ab}=$



(a) 1J22 磁化曲线 (b) 有限元剖分图

图2 DSEG 有限元模型

Fig.2 Finite element model of DSEG

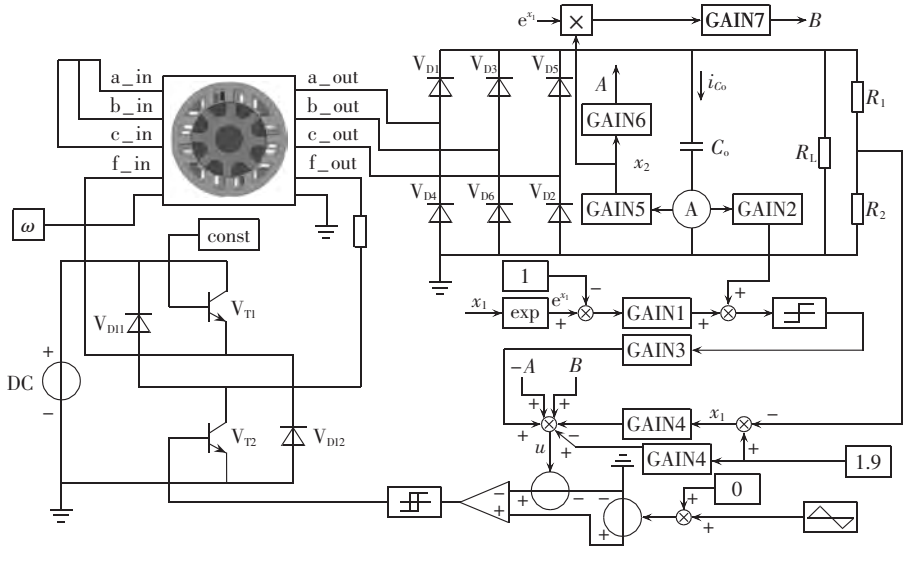


图3 基于 NTSM 控制的"场-路"联合仿真模型

Fig.3 Field-circuit co-simulation system based on NTSM

28.5 V，K=95 000，满载时的负载电阻为 0.14 Ω），且在建立仿真系统时 V_{T2} 的 PWM 驱动信号由控制律 u 与三角载波交截而成。因而，在建模时，控制律的构建和参数选取是整个仿真系统的关键。

如图 3 所示，控制律 u 可由以下方式计算得到。若设置参考电压 U_r=1.9 V，则输出电压比例系数 β=1.9/28.5=0.067。由滤波电容 C_o=40 mF，可得 β/C_o=0.067/0.04=1.7。在实际仿真系统中，为计算方便，选取该值为 2.5，则状态变量 x_2 就可按式(5)实时计算得到。考虑到电容充放电电流较大，因而 x_2 计算值较大，不利于与三角载波交截。而对于 S，只需关心它的正、负。因此，可对系数进行缩放处理，将 S 缩小至原值的 1/1 000。则可得到图 3 中的 GAIN1 为 1，GAIN2 为 0.002 5。控制律 u 表达式第一部分的系数为 $1/(\beta e_{ab})$，按实际发电系统参数，得 $1/(\beta e_{ab})\approx 0.5$。考虑到该系数功用相当于传统 PI 控制系数中的比例系数，则增大增益，有助于减小系统的静差，因而可适当放大系数 $1/(\beta e_{ab})$。将其放大 10 倍后，可以得到 GAIN4 的增益为 5。随后，可以计算控制律的第二部分系数 $L/(\beta e_{ab}R_L)$，依据实际发电系统参数，可计算得 $L/(\beta e_{ab}R_L)$=0.000 19（实际取值 0.000 25）。控制律第三部分系数 $U_r/(\beta e_{ab})$=1，为恒值。$x_2 e^{x_1}$ 的系数 $\alpha C_o L/(\beta e_{ab})$=0.001。若考虑到 K=95 000，则可计算得控制律的最后一部分系数 $KC_oL/(\beta e_{ab})$=0.1。这样就可计算出控制律的值，然后与三角形载波相交截，从而得到功率管 V_{T2} 的 PWM 驱动信号。

为使控制律 u 被严格限制在三角载波的上、下限内，可使 u 的系数均放大 10 倍，则相应的系数见表 1。

表 1 仿真系统中系数取值

Table 1 Coefficients of simulation system

系数表达式	模型	计算选值	仿真实际值
α	GAIN1	1 000	1
$\beta/(1\,000C_o)$	GAIN2	0.002 5	0.002 5
$KC_oL/(\beta e_{ab})$	GAIN3	0.1	1
$1/(\beta e_{ab})$	GAIN4	5	50
β/C_o	GAIN5	2.5	2.5
$L/(\beta e_{ab}R_L)$	GAIN6	0.000 25	0.002 5
$\alpha C_oL/(\beta e_{ab})$	GAIN7	0.001	0.01

3.1　稳态调压仿真

基于上述“场–路”联合仿真系统模型，对 NTSM 控制励磁调节器进行了发电系统的稳态调压仿真，并与 VFECF 控制下的仿真结果进行了对比。图 4 给出了不同控制策略下的外特性曲线。由图可知：由于参数计算时以发电机满载为基准，因而 NTSM 控制下，负载 200 A 时的输出电压为 28.5 V，而轻载时输出电压稍高于额定电压。外特性曲线表明 NTSM 控制获得了与 VFECF 控制同样优良的静特性。

图 5 给出了 NTSM 和 VFECF 控制下轻微过载

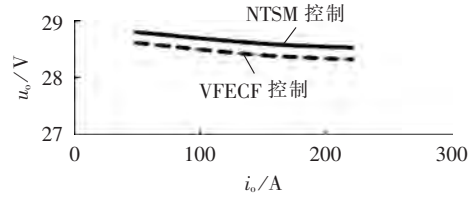
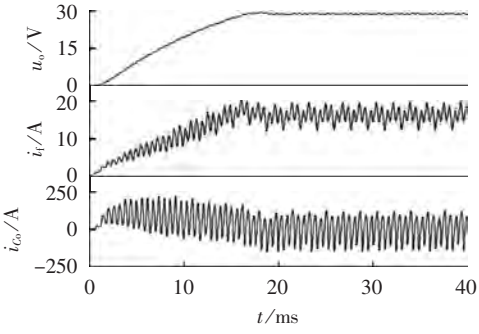
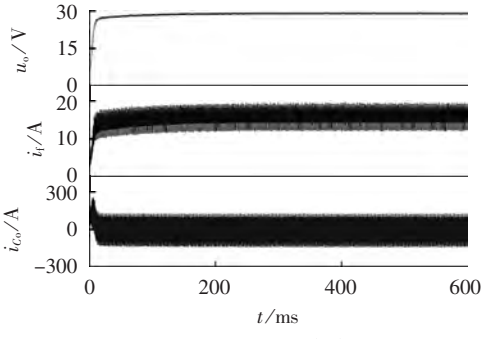


图 4 不同控制策略下的发电机外特性（n=4 200 r/min）

Fig.4 External characteristic of DSEG for different control strategies（n=4 200 r/min）



（a）NTSM 控制



（b）VFECF 控制

图 5 发电机稳态运行波形（n=4 200 r/min，i_o=250 A）

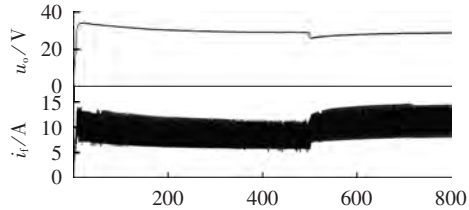
Fig.5 Steady-state waveforms of DSEG（n=4 200 r/min，i_o=250 A）

时的稳态发电波形。从图中可看出：NTSM 控制下的电压调节系统输出响应很快，仅 20 ms 就已进入稳态，且输出几乎无超调；而 VFECF 控制下，输出电压进入稳态则近 150 ms，远大于 NTSM 控制。2 种控制下的发电机输出电压纹波均很小，约为 0.8 V。

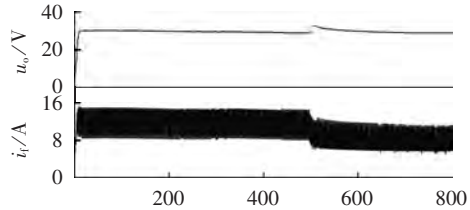
3.2　动态调压仿真

发电机调压系统除了应具有较高的稳压精度和良好的电压静特性（即外特性要硬）外，还需有优良的动态性能。

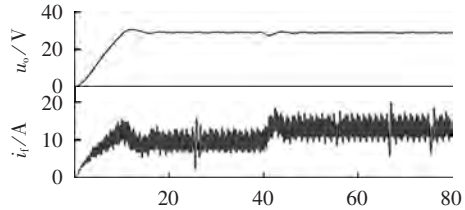
图 6 给出了不同控制策略下的发电机输出动态电压和励磁电流波形，相应的动态测试数据见表 2。从图 6 和表 2 可看出：NTSM 控制下的发电机动态性能要远好于 VFECF 控制，不仅恢复时间只有 VFECF 控制的 1/20，而且负载变化前后的输出电压变化也比 VFECF 控制要小。



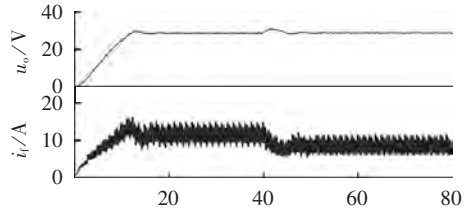
(a) i_o 从 150 A 突加至 250 A(VFECF 控制)



(b) i_o 从 250 A 突减至 150 A(VFECF 控制)



(c) i_o 从 150 A 突加至 250 A(NTSM 控制)



(d) i_o 从 250 A 突减至 150 A(NTSM 控制)

图 6 不同控制策略下的发电机动态波形
(n=6000 r/min)

Fig.6 Dynamic waveforms of DSEG for different control strategies(n=6000 r/min)

表 2 发电机动态调压测试数据(n=6000 r/min)

Table 2 Dynamic test data of DSEG (n=6000 r/min)

控制策略	i_o 从 150 A 突加至 250 A				i_o 从 250 A 突减至 150 A			
	Δu_o/V	i_f/A	m	t_r/ms	Δu_o/V	i_f/A	m	t_r/ms
VFECF 控制	↓3.5	8→11	1	200	↑4	11→8	1	250
NTSM 控制	↓2	8→11	2	10	↑2.5	11→8	2	14

注:Δu_o 为输出电压变化;m 为振荡次数;t_r 为恢复时间。

4 结论

本文针对 DSEG 发电调压系统,提出了一种新型固定频率 PWM 型 NTSM 控制器,用于发电机的励磁电流调节,以实现优良的调压性能。本文在建立 DSEG 数学模型和分析 NTSM 控制调压原理的基础上,结合李雅普诺夫稳定性条件,详细地推导了滑模系数的选取范围和控制律系数的计算方法。最后,基于有限元分析模型,建立了基于 NTSM 控制的 DSEG 发电调压系统"场-路"联合仿真模型,对发电系统的稳态和动态性能进行了仿真测试,验证了 NTSM 控制理论的正确性和方案的可行性。其仿真结果与 VFECF 控制相比:基于 NTSM 控制的 DSEG 发电调压系统在获得优于 VFECF 控制的稳态性能的同时,还获得了远优于 VFECF 控制的动态性能,具有调节时间短、静压差和纹波小,以及动态恢复时间快、动态输出电压变化小等优点。

参考文献:

[1] LIAO Yuefeng,LIPO T A. Sizing and optimal design of doubly salient permanent magnet motors[C]//The sixth International Conference on Electrical Machines and Drives. Oxford,UK:[s.n.],1993:452-456.

[2] CHENG Ming,CHAU K T,CHAN C C. Static characteristics of a new doubly salient permanent magnet motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversations,2001,16(1):20-25.

[3] 张乐,周波,方斯琛. 基于三维非线性电感模型电励磁双凸极发电机系统建模的研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(23):126-132.
ZHANG Le,ZHOU Bo,FANG Sichen. Research on the doubly salient electromagnetic generator based on three-dimensional nonlinear inductance model[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(23):126-132.

[4] SARLIOGLU B. Design and analysis of a novel double salient single permanent generator[D]. Madison,USA:University of Wisconsin,1998.

[5] 朱孝勇,程明. 定子永磁型混合励磁双凸极电机设计、分析与控制[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2010,40(9):1061-1073.
ZHU Xiaoyong,CHENG Ming. Design,analysis and control of hybrid excited doubly salient stator-permanent-magnet motor[J]. Science China Technological Sciences,2010,40(9):1061-1073.

[6] DAI Weili,XIU Tongcai,WANG Huizhen,et al. Control of a novel dual stator doubly salient aircraft engine starter-generator [C]//The 37th IEEE PESC. Jeju,Korea:IEEE,2006:2818-2822.

[7] FAN Y,CHAU K T. Design,modeling,and analysis of a brushless doubly fed doubly salient machine for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2008,44(3):727-734.

[8] FAN Ying,CHAU K T,NIU Shuangxia. Development of a new brushless doubly fed doubly salient machine for wind power generation[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2006,42(10):3455-3457.

[9] 孟小利,王莉,严仰光. 一种新型电励磁双凸极无刷直流发电机[J]. 电工技术学报,2005,20(11):10-15.
MENG Xiaoli,WANG Li,YAN Yangguang. Novel field-winding doubly salient brushless DC generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(11):10-15.

[10] 戴卫力,高翔,陈志辉,等. 混合励磁双凸极发电机双向励磁调压器的研制[J]. 中国电机工程学报,2008,28(26):104-110.
DAI Weili,GAO Xiang,CHEN Zhihui,et al. Design and research of bidirectional excitation voltage regulator of doubly salient hybrid excitation generator[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(26):104-110.

[11] 王莉,杨善水,张卓然,等. 负载电流反馈补偿法在双凸极无刷直流发电机数字调压器中的应用[J]. 航空学报,2006,27(5):

934-938.
WANG Li,YANG Shanshui,ZHANG Zhuoran,et al. Application of load current feedback compensating in digital voltage regulation for doubly salient brushless DC generator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2006,27(5):934-938.
[12] 王莉,曹小庆,张卓然,等. 电励磁双凸极无刷直流发电机非线性PI调压技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):153-158.
WANG Li,CAO Xiaoqing,ZHANG Zhuoran,et al. Research of nonlinear PI voltage regulation for doubly salient brushless DC generator[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(5):153-158.
[13] 杨善水,张卓然,杨春源,等. 基于多环电压控制的混合励磁航空变频交流发电系统[J]. 电工技术学报,2012,27(3):176-180.
YANG Shanshui,ZHANG Zhuoran,YANG Chunyuan,et al. Aeronautic variable frequency AC generation system based on multi-loop controlled voltage regulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(3):176-180.
[14] CH U M,BABU Y S K,AMARESH K. Sliding mode speed control of a DC motor[C]//2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies. Katra,Jammu,India:IEEE,2011:387-391.
[15] ZHOU Minghao,FENG Yong,YU Xinghuo. High-order terminal sliding mode observer for speed estimation of induction motors [C]//8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA). Melbourne,Australia:IEEE,2013:1045-1048.
[16] BELTRAN B,EI HACHEMI BENBOUZID M,AHMEDALI T. Second-order sliding mode control of a doubly fed inducting generator driven wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2012,27(2):261-269.
[17] YAN Jianhu,LIN Heyun,FENG Yi,et al. Improved sliding mode model reference adaptive system speed observer for fuzzy control of direct-drive permanent magnet synchronus generator wind power generation system[J]. Renewable Power Generation,2013,7(1):28-35.
[18] 刘英培,栗然,梁宇超. 基于双滑模变结构PMSM直接转矩控制无传感器运行[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):86-100.
LIU Yingpei,LI Ran,LIANG Yuchao. Sensorless operation of PMSM by direct torque control based on double VSS[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):86-100.
[19] CHEN Hao,WANG Xing,GU J J. Sliding mode control of switched reluctance linear generator system[C]//2009 IEEE International Conference on Networking,Sensing and Control. Okayama,Japan:IEEE,2009:779-782.
[20] 张晓光,孙力,陈小龙,等. 基于二阶滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):33-41.
ZHANG Xiaoguang,SUN Li,CHEN Xiaolong,et al. PMSM sensorless control based on second-order sliding mode observer [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):33-41.

作者简介:

戴卫力(1979—),男,江苏张家港人,副教授,博士,主要研究方向为电机设计与控制、无线电能传输及新能源发电技术(**E-mail**:hhucdaiwl@gmail.com)。

Design and simulation of nonsingular terminal sliding mode controller for doubly salient electromagnetic generator system

DAI Weili,DING Jun,TIAN Hao,FEI Juntao

(Jiangsu Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment Technology,
College of IOT Engineering,Hohai University,Changzhou 213022,China)

Abstract: A strategy of nonsingular terminal sliding mode control is proposed for the voltage regulation system of DSEG(Doubly Salient Electromagnetic Generator). The structure of DSEG is described and its mathematical model is established,based on which,the operating principle of voltage regulator based on proposed control strategy is analyzed in detail and the corresponding sliding mode surface equation and sliding mode law are given. The control law parameters are calculated according to the constraint conditions of Lyapunov stability equation and the carrier wave intersection with fixed PWM control. A field-circuit co-simulation model is built based on the electromagnetic finite element analysis technique and the control circuit. The results of steady-state and dynamic simulations for DSEG show that,the voltage regulation system of DSEG based on the nonsingular terminal sliding mode control has excellent steady-state and dynamic performances,with small voltage ripple,short recovery time and little dynamic output voltage variation.

Key words: electric generators; doubly salient electromagnetic generator; voltage regulator; nonsingular terminal sliding mode control; sliding mode control; field-circuit co-simulation