

[异步发电机]

基于Simulink异步发电机带阻感负载运行的暂态分析

文/国网山东省电力公司威海供电公司 韩超先 宋建光 隋宗强 博乐

为了对异步发电机带阻感负载运行时的电压暂态过程进行分析, 根据异步发电机在两相静止坐标系下的状态方程, 建立异步发电机Simulink仿真模型。进而建立异步发电机带阻感负载运行的模型, 利用所建立的模型对异步发电机投切阻感负载时的电压暂态过程进行仿真分析。仿真波形和试验波形的一致, 说明了该方法的正确性。

目前, 全球性能源危机日益加重, 人们对环境保护的呼声日渐高涨, 在应对能源危机和环境保护的双重任务下, 人们对清洁能源的开发和利用日益迫切, 清洁能源技术成为关注重点。同时在偏远地区、海岛等远离大电网的地域环境下, 分布式微电网的应用变得越来越广泛。在此背景下, 异步发电机发电技术作为风能、水能等清洁能源以及分布式微网发电的重要技术自然地成为目前的研究热点。与此同时, 随着近代电力电子技术的快速发展使得对于异步发电机通过无功调节稳定电压和频率的目的更加易于实现。由此, 异步发电机结构简单, 易于制造, 运行可靠, 维护方便, 且无需提供单独励磁电源等优点得以体现。

异步发电机作为独立电力系统的发电单元带载运行后, 端电压的大小都将随负载的大小而变化。这很可能会使端电压无法满足运行的要求。而且负载大小和性质的不同, 对端电压大小的影响也会不同。因此, 只有确切了解了异步发电机端电压大小的变化情况才能对电压和频率的补偿提出相应的措施, 所以, 相关的研究有着现实意义。

本文从两相静止坐标系下的异步发电机的状态方程出发, 建立了异步发电机带阻感性负载的

Simulink模型, 并介绍了其主要工作过程, 仿真分析了负载参数变化时的机端电压的暂态变化过程。采用Simulink软件进行模型的建立和仿真能够极大地简化编程工作, 以直观简单的图形方式对电气系统进行模型描述, 使得电路拓扑清晰, 并且仿真结果直观、准确。

异步发电机模型

设 R_s 、 L_s 、 R_r' 、 L_r' 分别是发电机定子侧电阻和漏电感以及转子侧电阻和漏电感的折算值, L_m 是励磁电感, u_{d1} 、 u_{q1} 是定子端电压值, ω 为转子电角速度。异步发电机两相静止坐标系下的状态方程为式(1)

$$P \begin{bmatrix} \dot{i}_{d1} \\ \dot{i}_{q1} \\ \dot{i}_{d2}' \\ \dot{i}_{q2}' \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} -R_s L_r' & \omega L_m^2 & R_r' L_m & \omega L_m L_r' \\ -\omega L_m^2 & -R_s L_r' & -\omega L_m L_r' & L_2 L_m \\ R_s L_m & -\omega L_m L_s & -R_r' L_s & -\omega L_s L_r' \\ \omega L_m L_s & R_s L_m & \omega L_s L_m & -R_r' L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2}' \\ i_{q2}' \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} L_r' & 0 \\ 0 & L_r' \\ -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{q1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $k = \frac{1}{L_r' L_s - L_m^2}$ 。发电机运行中由于磁饱和和特性的存在, 励磁电感的大小与励磁电流有密切的关系, 因此励磁电流是建模过程中的一个必须考虑的因素。励磁电流瞬时值计算公式为式(2)

$$i_m = \sqrt{(i_{d1} + i_{d2}')^2 + (i_{q1} + i_{q2}')^2} \quad (2)$$

因为状态方程中的 A 、 B 矩阵的元素要随状态变量的变化而变化,为计算状态方程 $AX+BU$,引入了MATLAB函数模块,通过调用编写的

MATLAB函数模块中的M文件可以实现系数矩阵 A 、 B 随电动机状态变量的变化而变化。利用上述方法建立的异步发电机Simulink模型如图1所示。

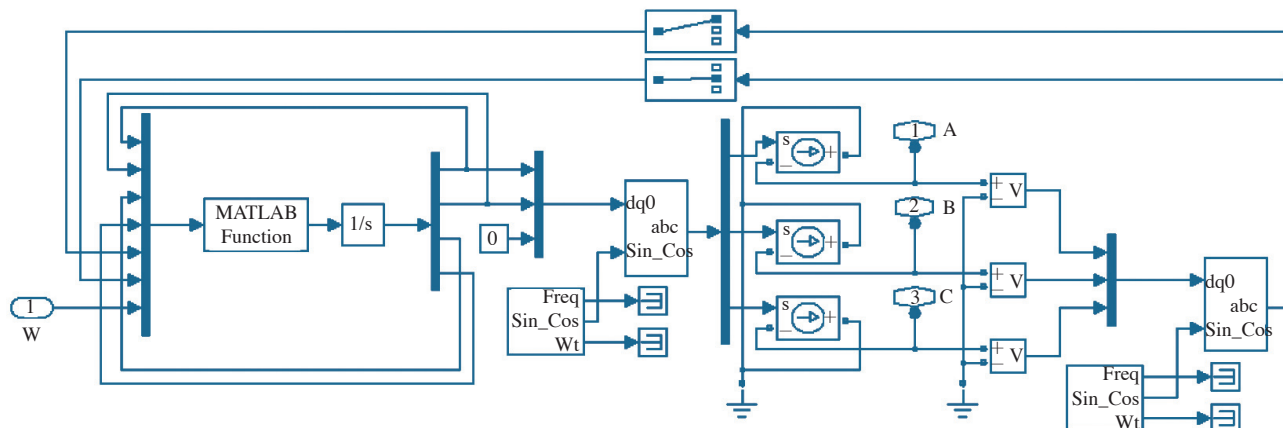


图1 异步发电机的Simulink模型

该系统的输入量为转子电角速度,函数模块MATLAB Function的输入为状态变量、两相静止电压和转子电角速度。在函数模块中编写的M文件完成对状态方程 $AX+BU$ 的计算,输出为两相静止坐标系下的定子、转子两相电流的一阶导数值,并通过积分环节得到两相的电流值,在将两相电流值反馈给函数模块的同时将定子端的两相电流通过dq0-abc变换(0轴电流分量为0计,提供Sin_Cos信号的Discrete Virtual PLL模块的Freq端和Phase均设为0,输出的Freq端和Wt端分别接Terminator),转化为ABC相电流,由于在MATLAB模型中信号线与电气线的区分,得到的ABC三相电流信号必须通过三个受控电流源(注意设置合适的相角和初始幅值)转化为电气信号,从而得到该系统的输出。同样道理ABC三相的电压必须经过三个电压表模块将电气线上的信号转化为信号线上的信号,然后再经过一次abc-dq0变换得到两相静止电压并通过信号选择器分别将d轴和q轴的电压分量反馈给函数模块作为输入(Discrete Virtual PLL模块的设置和前面的设置相同)。

发电机的磁化曲线通过空载试验获得,并和其他发电机参数一起通过MATLAB函数的M文件写入,发电机的剩磁通过预设合适的受控电流源的初始值得以实现。可以看出利用Simulink建立仿真模型是十分简单易懂的;电路的拓扑结构,工作流程也是十分直观清楚的;对于不同仿真要求的模型,数据的修改既可以打开M文件直接修改,也可以通过在封装时创建的对话框修改,同样十分方便快捷。

将此模型封装成generator子模块,模块的输入量为转子电角速度,输出端为定子三相接线端。此外,模型子模块化后可以方便地在以后其他地系统中使用,具有很好的通用性和可移植性。

发电机带载运行模型

利用建立的generator子模块,负载选为最具一般性的阻感性负载,利用断路器实现对负载的投切控制,建立异步发电机带载运行的模型如图2所示。

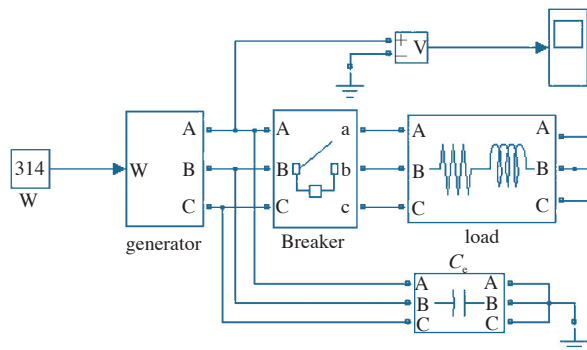


图2 异步发电机带阻感性负载运行的Simulink模型

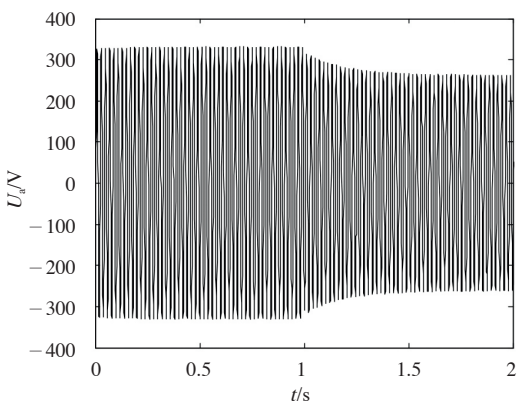
该模型中所使用的异步发电机的额定值为:额定功率2.2 kW,定子Y接,额定电压380 V,额定电流5.0 A,额定频率50 Hz,2对极,作电动机运行时的额定转速1 420 r/min。发电机参数为: $R_s=2.8 \Omega$, $R_r'=3.2 \Omega$, $L_s=L_r'=0.0109$ H。自励建压电容 C_c 采用40 μ F。发电机的磁化曲线为

$$M = \begin{cases} 0.3754 & i_m < 1.508 \\ 0.5047 / (0.2279i_m + 1) & 1.508 \leq i_m < 2.511 \\ 0.6207 / (0.3720i_m + 1) & i_m \geq 2.511 \end{cases} \quad (3)$$

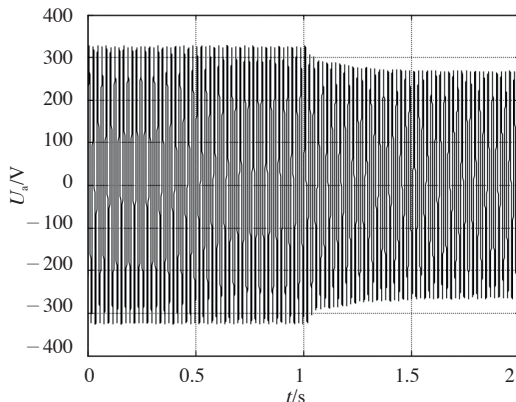
系统中三相断路器的初始状态为断开，三相负载为Y型接法。异步发电机的输出端与断路器及负载相连，自励建压电容与断路器并联后Y接地。利用一个电压表模块测量发电机A相电压 u_a 输入显示器。仿真时，当异步发电机子模块输入恒定的转子电角速度后，异步发电机在电动机剩磁和自励建压电容的作用下进行空载建压，当发电机建压稳定后，三相断路器的定时开关实现负载的投切。仿真所产生的数据由显示器保存到工作空间（Save to workspace），实现后面的暂态波形的绘制和分析，同时显示器可实时显示A相的电压、电流暂态波形，所以使用Simulink对发电机暂态进行仿真时具有较强的可视性，并且仿真结果准确。

投切阻感性负载的电压暂态分析

异步发电机带阻感性负载运行是最为常见的

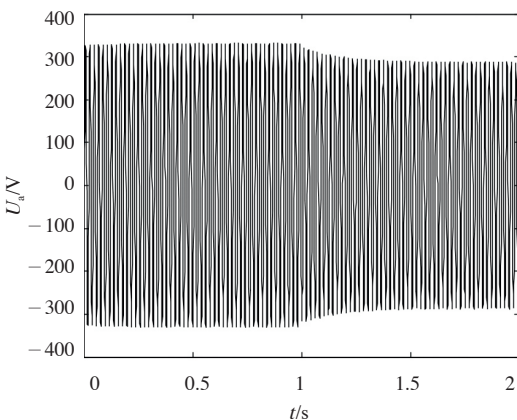


(a) 电压仿真波形

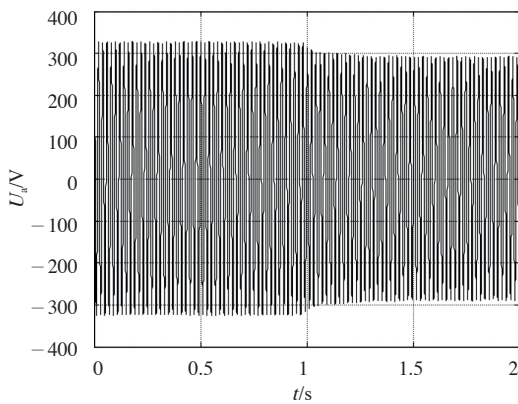


(b) 电压试验波形

图3 突加 $Z=225\ \Omega$ 、 $\cos\varphi=0.89$ 负载时电压波形



(a) 电压仿真波形



(b) 电压试验波形

图4 突加 $Z=339\ \Omega$ 、 $\cos\varphi=0.89$ 负载时电压波形

形相互吻合，当异步发电机运行达到稳态后，突然投入负载（未超过最大允许负载），机端电压会发生振荡衰减，并最终稳定于一较小值。同

运行情况。利用模型对负载变化引起的电压变化过程进行仿真，通过所得到的数据绘制得到电压变化仿真波形。

试验验证时，先利用直流电动机将异步发电机转子转速拖至额定转速1 500 r/min，并通过全数字直流调速装置控制直流机的转速，保证发电机转速在负载变化时保持1 500 r/min不变。发电机在自励电容的作用下自激建压，稳定后投切负载，并由数字录波仪录得电压暂态数据。

1. 突然加载

模型中通过断路器在 $t=1.0$ s时刻投入负载。图3和图4分别给出异步发电机在空载时突加 $Z=225\ \Omega$ 、 $\cos\varphi=0.89$ 和 $Z=339\ \Omega$ 、 $\cos\varphi=0.89$ 负载的机端电压仿真波形和试验波形。

观察比较波形可以发现，试验波形和仿真波

时，当负载较重时电压降落较大，振荡较明显，重新达到稳态的过程也较长。电压振荡的原因是自激电容的存在使得机端电压不能发生突变，只

能振荡下降。

2. 突然卸载

模型中通过断路器在 $t=1.0\text{s}$ 时刻切除负载。图5和图6分别给出异步发电机在带载时突

减 $Z=225\ \Omega$ 、 $\cos\varphi=0.89$ 和 $Z=339\ \Omega$ 、 $\cos\varphi=$

0.89负载的机端电压仿真波形和试验波形。观察比较波形可以发现, 试验波形和仿真波形相互吻合, 当异步发电机带载运行达到稳定

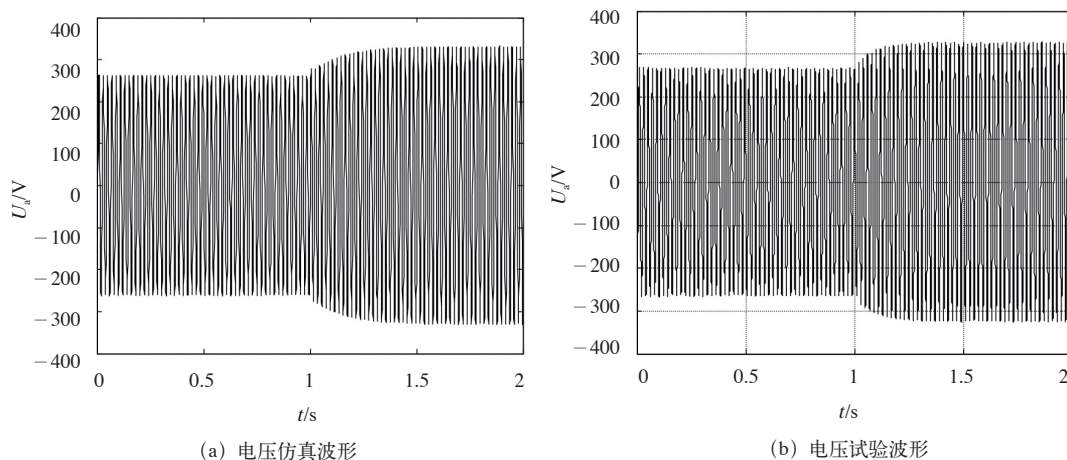


图5 突减 $Z=225\ \Omega$ 、 $\cos\varphi=0.89$ 负载时电压波形

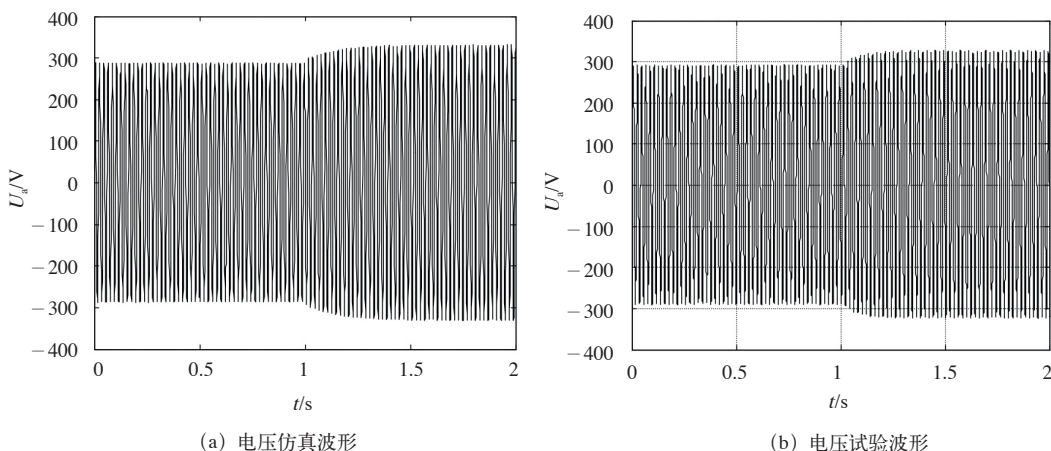


图6 突减 $Z=339\ \Omega$ 、 $\cos\varphi=0.89$ 负载时电压波形

后, 突然切除负载, 机端电压会振荡升高, 并最终稳定于空载电压值。负载较重时, 振荡较明显, 重新达到稳态的时间也较长。负载的切除使得电路恢复到空载时的情况, 电压上升的同时由于自励电容的存在使得电压不可突变, 振荡上升。

结束语

从异步发电机在两相静止坐标系下的状态方程出发, 建立了异步发电机的Simulink模型以及异步发电机带负载运行模型, 介绍了模型的工作过程和特点, 利用仿真数据绘制异步发电机投切阻

感性负载时的电压暂态波, 分析了异步发电该暂态过程的特点。

利用Simulink建模仿真异步发电机机电过程极大地减少了编程的工作量, 是一种简单、易用的方法, 通过对常用模型的子模块化使得其又具有很好的通用性和移植性。试验结果和仿真结果的一致进一步说明了该方法的准确性和有效性。EA

(收稿日期: 2015.07.31)

(编辑: 白文亭)