

双馈电机驱动的飞轮储能系统稳定运行 控制方法

陈仲伟¹, 李达伟¹, 邹旭东², 邓凯¹, 王逸超¹, 肖振锋¹, 李沛哲¹

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南长沙 410004; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要:双馈电机驱动的飞轮储能多功能柔性功率调节器(FPC)中的电机可看作转动惯量很大且不带机械负载的双馈电动机或不带原动机的双馈发电机,能快速调节有功功率和无功功率,从而提高电力系统稳定性。在分析其启动和运行控制策略的基础上,设计一套额定容量为10 kV·A FPC励磁控制系统。对所提控制方法进行实验研究,实验包括对系统的启动特性、稳定运行后稳态和动态性能等,结果表明,该系统能够实现软启动,输出有功、无功功率可以独立调节,适合于带飞轮储能的双馈电机励磁控制系统。

关键词:柔性功率调节器(FPC);双馈电机;交/直/交变换器

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.020 中图分类号:TM761 文章编号:1673-9140(2021)01-0177-08

Research on stable operation control method of flywheel energy storage system driven by doubly fed machine

CHEN Zhongwei¹, LI Dawei², ZOU Xudong², DENG Kai¹,
WANG Yichao¹, XIAO Zhenfeng¹, LI Peizhe¹

(1. Economic & Technical Research Institute State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China;

2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The motor of a doubly-fed induction machine (DFIM) driven multi-functional flexible power conditioner (FPC) can be treated as a doubly-fed induction motor with a large rotating inertia and without mechanical load or a doubly-fed induction generator without motor. It can regulate the active and reactive power rapidly to enhance the stability of power system. Based on the analysis of control strategy, a 10 kV·A excitation control system of FPC is developed. The proposed control method is experimentally running. Experimental results show that soft start can be implemented, and active/reactive power can be regulated independently. The excitation control system can be applied to a flywheel type FPC system.

Key words: flexible power conditioner; doubly-fed induction machine (DFIM); back-to-back converter

收稿日期:2018-11-09;修回日期:2019-07-09

基金项目:国家重点研发计划(2018YFE0125300);湖南省科技创新平台与人才计划(2019TP1053)

通信作者:陈仲伟(1984-),男,博士,高级工程师,主要从事智能电网、储能研究;E-mail:czw1984joe@163.com

多功能柔性功率调节器(flexible power conditioner, FPC)将飞轮储能技术和传统的同步调相技术有机地结合在一起,能够实时在线感受电力系统功率的不平衡,利用功率控制向电力系统释放或吸收有、无功功率来对电网中的不平衡功率进行调节。通过特定的算法, FPC 可以主动监测到并解决由故障后的功率不平衡给电网稳定性所带来的影响,这种电力系统稳定控制措施被称为主动致稳^[1-4]。

FPC 由转子带大转动惯量飞轮的双馈电机、交流励磁电源和微机励磁控制器 3 部分组成。选择双馈电机是由于其交流励磁电源在运行中只需提供转差功率^[5],从而大大减小了装置对电力电子变换器容量的需求,这对在电网中使用的大容量 FPC 装置有着重大实践意义。

该文研制了一套额定容量为 10 kV · A FPC 励磁控制系统,并利用此 FPC 系统进行了丰富的实验研究。该 FPC 系统采用 back-back 电压型变换器结构,电网侧整流器利用电压定向的矢量控制策略,以稳定直流母线电压为控制目标,转子侧逆变器则采用定子磁链定向的矢量控制策略,以控制输出功率或转速为控制目标^[6-10]。该文在转子侧逆变器矢量控制策略基础上提出一种新的 FPC 双馈电机直接变频启动方法,且试验结果表明,该系统能够使 FPC 实现软启动,做到启动瞬间无冲击、启动过程平稳且对电网无冲击。在运行过程中,实现输出有功、无功功率能够独立调节等功能,具有能量双向流动的能力,并且其输出功率因数可以调节,适合对带飞轮储能的双馈电机进行励磁控制。

1 励磁控制系统原理

双馈电机转子侧的变换器对 FPC 系统进行励磁控制,该文所研究的 FPC 系统结构图如图 1 所示,其励磁控制主要包括连接在电网侧整流器和双馈电机转子侧逆变器 2 个部分^[11]。

1.1 双馈电机数学模型

当 FPC 双馈电机转子侧采用电动机惯例和定子侧采用发电机惯例时,可得到用下列方程描述两相同步旋转 dq 坐标系下 FPC 的数学模型(恒功率

坐标变换)^[12-16]。

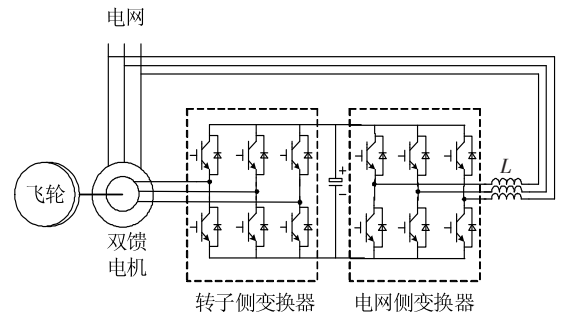


图 1 FPC 系统结构

Figure 1 Structure of FPC system

磁链方程:

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_0 i_{dr} \\ \Psi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_0 i_{qr} \\ \Psi_{dr} = -L_0 i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \Psi_{qr} = -L_0 i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (1)$$

电压方程:

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} + p \Psi_{ds} - \omega_1 \Psi_{qs} \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} + p \Psi_{qs} - \omega_1 \Psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + p \Psi_{dr} - \omega_2 \Psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p \Psi_{qr} - \omega_2 \Psi_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程:

$$T_{em} = n_p L_0 (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

转子运动方程:

$$\begin{aligned} -T_{em} &= D \frac{\omega_r}{n_p} + J \frac{1}{n_p} p \omega_r = \\ & \frac{1}{n_p} (D + J p) \omega_r \end{aligned} \quad (4)$$

定子侧功率方程:

$$\begin{cases} P_s = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} \\ Q_s = u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

式中 R 为电阻; L 为电感; ψ 为磁链; T_{em} 为电机电磁转矩; 下标 s, r, d, q 分别为定子相关量、转子相关量、 dq 坐标系中的 d 轴分量、 dq 坐标系中的 q 轴分量; D 为转矩阻尼系数; n_p 为极对数; J 为转子的转动惯量; $\omega_r, \omega_1, \omega_2$ 分别为转子电角速度、同步角速度、转差角速度; p 为微分算子。

1.2 转子侧变换器矢量控制

FPC 双馈电机的转子励磁电源采用定子磁场定向^[8-9]的矢量控制策略。而电机定子直接接于电

网,当电网电压维持恒定时,定子磁链保持 Ψ_s 不变。将同步旋转坐标系中的 d 轴定位于定子磁链矢量方向。当忽略定子电阻时,有

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = \Psi_{sm} \\ \Psi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{ds} \approx 0 \\ u_{qs} \approx U_{sm} \end{cases} \quad (7)$$

式中 Ψ_{sm} 为定子磁链幅值; U_{sm} 为定子电压幅值。

通过推导可得双馈电机定子输出的有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 的表达式:

$$\begin{cases} P_s \approx U_{sm} \frac{L_0}{L_s} i_{qr} \\ Q_s \approx U_{sm} \frac{\omega_1 L_0 i_{dr} - U_{sm}}{\omega_1 L_s} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,双馈电机的有功功率与 i_{qr} 成正比,而 i_{dr} 决定无功功率,在励磁控制中分别对转子 dq 轴电流进行控制就可实现双馈电机有功、无功功率的解耦。同时,利用前馈补偿去除交叉耦合项后,即可利用对转子电压的控制分别调控发电机的有功、无功功率。将式(6)、(7)分别带入式(1)、(2)可得

$$\begin{cases} u_{dr} = (R_r + \sigma L_r p) i_{dr} - \omega_2 \sigma L_r i_{qr} \\ u_{qr} = (R_r + \sigma L_r p) i_{qr} + \omega_2 (\sigma L_r i_{dr} + \frac{L_0}{L_s} \Psi_{sm}) \\ u_{dr} = u_{dr1} - \omega_2 \sigma L_r i_{qr} = u_{dr1} + \Delta u_{dr} \\ u_{qr} = u_{qr1} + \omega_2 (\sigma L_r i_{dr} + \frac{L_0}{L_s} \Psi_{sm}) = u_{qr1} + \Delta u_{qr} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\sigma = 1 - L_0^2/L_s L_r$ 为漏抗因子; Δu_{dr} 、 Δu_{qr} 为消除 dq 轴之间交叉耦合的补偿项; u_{dr1} 、 u_{qr1} 为实现 dq 解耦控制的解耦项; v_{dq} 为桥臂输出电压的 dq 分量。

式(9)所述的励磁控制系统可以利用电流和功率双闭环对 FPC 双馈电机进行有效控制。

功率、电流双环控制系统可以有效地控制电机向电网输出有功功率和无功功率,但是却无法稳定电机转速^[17]。当 FPC 启动,电机转速将要达到给定转速时,还需将控制系统切换到速度环以稳定转速。同时由式(8)可知,电机向电网输出的有功功率 P_s 正比于转子无功电流 i_{qr} ,即控制好电流内环的给定电流就可以控制好 P_s ,无需再加定子有功功

率环。

由式(3)、(4)可以推出:

$$\omega_r = -\frac{L_0 n_p^2 U_s i_{qr} / L_s \omega_1}{J p + D} \quad (10)$$

式(9)、(10)构成了速度、电流双闭环的 FPC 励磁控制系统。根据控制目标的不同,FPC 励磁控制系统可以在速度、电流双闭环和功率、电流双闭环控制模式之间相互切换。由于 2 种模式的内环控制相同,因此只需要在程序中进行速度外环和有功功率外环的切换即可满足要求。FPC 励磁控制框图如图 2 所示。

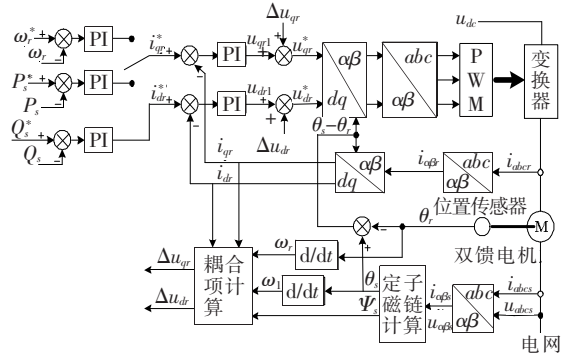


图 2 FPC 转子侧变换器矢量控制系统

Figure 2 Block diagram of rotor-side converter vector control

1.3 电网侧变换器矢量控制

FPC 电网侧变换器的主要作用是能量流动过程中保持直流母线电压恒定,为转子侧变换器提供能量双向流动的通路,同时使网侧的功率因数可控。在两相同步旋转坐标系下建立网侧电压型 PWM 整流器的数学模型^[14,18]:

$$\begin{cases} v_d = -L \frac{di_d}{dt} - Ri_d + \omega_e Li_q + u_d \\ v_q = -L \frac{di_q}{dt} - Ri_q + \omega_e Li_d + u_q \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_L \end{cases} \quad (11)$$

式中 u_d 、 u_q 为电网电压的 d 轴和 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为输入交流电流的 d 轴和 q 轴分量; v_d 、 v_q 分别为桥臂输出电压的 d 轴和 q 轴分量; u_{dc} 为直流母线电压; ω_e 为同步角速度。

电网侧整流器的控制系统如图 3 所示。

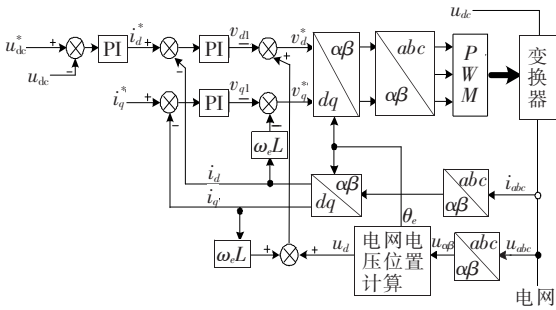


图 3 电网侧变换器矢量控制系统

Figure 3 Block diagram of grid-side converter vector control

2 FPC 的启动控制

FPC 双馈电机可以看作无原动机的双馈发电机,一般有 2 类方法启动:一是利用转子绕组串电阻或电抗启动^[19-20];二是变频器直接变频启动。

作为绕线式异步电机常用的启动方法,转子绕组串电阻或电抗启动需增加额外的启动电阻或电抗,因此整个装置的体积和重量都要增大,既而增加了整套控制系统的成本,并且其切换控制也比较复杂。而变频启动方法通过对变频器进行有效控制,能够减小电机启动电流冲击。

利用变频器直接变频启动 FPC 双馈电机,有 3 个关键问题,一是尽量减小转子侧合闸时产生的对变频器的冲击;二是启动过程中电机与电网交换的有功功率应控制在一个范围内,减小启动时对电网的影响;三是在满足前两者的基础上尽量提高启动时的电磁转矩以缩短启动时间。

FPC 双馈电机启动前,先将定子绕组接入电网,此时电机未转动,可将其看成一个变压器,因此转子绕组将产生相位、频率与电网电压一致的感应电势,感应电势的幅值与电网电压之比即为电机定子绕组之比。为了减小启动过程中转子绕组的冲击电流,需要在变换器输出的电压与转子感应电压相差很小时,再将变换器投入。

为了避免转子绕组中冲击电流的发生,需要对 FPC 双馈电机的励磁控制系统做一定的优化。

第 1 种启动策略是采用功率外环加电流内环启

动^[21-27],在定子有功环外再加一个转子有功环以限制转子功率。由于启动前转子中无电流,由式(9)可得

$$\begin{cases} u_{dr} = 0 \\ u_{qr} = \omega_2 \frac{L_0}{L_s} \Psi_{sm} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可以看到启动前转子电压只由定子磁链决定,即控制系统中的前馈量。在启动前将控制系统中 4 个 PI 调节器的输入偏差信号置零,PI 调节器相当于被封锁,此时只有前馈量起作用,所以变频电源输出电压值与转子实际电压相差很小,变频器切入时不会产生很大冲击。启动时,将 PI 调节器解锁,电机升速到给定转速附近时,将功率环切换到速度环,稳定飞轮转速。

这种方法的优点在于通过功率环控制 FPC 双馈电机启动时对电网吸收的有功功率以减小电机启动时对电网的影响,同时,FPC 双馈电机产生的冲击电流也很小。

该方法在启动时经历了 2 次切换,即 PI 调节器的封锁和解锁,功率环到速度环的切换。控制系统在实现上较复杂。

第 2 种启动策略是以速度、电流双环为基础,采用以下的优化方法,避免功率环到速度环的切换以减少对电网的冲击。

①对进入每个 PI 调节器的误差进行限幅,控制数字 PI 调节器每次可以调节的最大值。在此阶段能够尽量提高启动时的电磁转矩以缩短启动时间。

②对 U_{rm}^* 进行限幅。 U_{rm} , U_{sm} 和转速 ω_r 的关系:

$$U_{rm} = |s| \cdot k \cdot U_{sm} = \left| \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} \right| \cdot k \cdot U_{sm} \quad (13)$$

式中 s 为转差率; k 为电机转定子匝数比。

由式(13)可以看出,启动前 $\omega_r = 0$, $s = 1$,即 $U_{rm} = kU_{sm}$;启动后,转速 ω_r 上升, s 下降,即 U_{rm} 下降;当 $\omega_r \neq 0$ 且 $U_{rm} \geq kU_{sm}$ 时,应为 $\omega_r \geq 2\omega_1$ 或 $\omega_r \leq 0$ (反转)。FPC 的转速一般不会超过同步转速的 2 倍,也不会反转,所以当电网电压稳定时, U_{rm} 的最大值

为 kU_{sm} 。将 kU_{sm} 作为 U_{rm}^* 的限幅值。

变频器投入前先锁相,保证输出电压相位与转子感应电压一致。启动一瞬间,速度和电流都近似于 0,所以速度和电流 2 个 PI 调节器都是限误差值输出,输出值较小,此时前馈量 Δu_{qr} 起主导作用, $\omega_2 = \omega_1$, Δu_{qr} 近似于转子侧感应出来的电压,那么计算出来的 U_{rm}^* 就是比限幅值略大的数,经过 U_{rm}^* 限幅,变频器输出一个频率、相位、幅值与转子绕组产生的感应电势相差很小的电压,因此变频器投入时,电流冲击很小。

③对每个 PI 调节器的输出值进行限幅,控制数字 PI 调节器输出的最大值。

启动后,电流 PI 调节器输出值绝对值增大,由于是负值,加上前馈量以后逆变器输出转子电压给定减小,转子电流继续增大到给定电流值,即速度 PI 调节器输出的限幅值,此过程的时间非常短。

飞轮速度上升的过程中,由于速度 PI 调节器的输出是一个限幅值,基本没有发挥作用,相当于开环,此时主要是电流环起作用,即启动过程是一个 i_{qr} 基本不变的过程。而 i_{qr} 基本不变还可以起到保证启动时电磁转矩不变和限制电机吸收电网有功功率的双重作用。

由式(10)看出转子电流无功分量 i_{qr} 与电磁转矩 T_{em} 为比例关系。因此,启动过程中,电磁转矩也基本不变,一直保持在最大值。当摩擦系数 D 很小时,转速匀速快速上升至给定值。

由式(8)可以得到 i_{qr} 与向电网输出的有功功率 P 成正比,因此, i_{qr} 值限幅后,向电网输出的有功功率也会被限制在一个固定值。实际上达到了类似功率环控制的效果。

当飞轮转速接近给定转速时,速度环的输入偏差信号变小,其输出不再是限幅值,速度环开始起作用,将转速稳定在给定转速附近。

由以上分析可以看出,从启动到接近给定转速之前,第 1 种利用功率环启动策略和第 2 种利用速度环启动的过程是相似的,2 个外环 PI 控制器都是限幅输出,只有电流环起作用。不同点在于第 1 种

利用功率环启动策略在到达给定转速时需要切换到速度环稳定转速,而第 2 种利用速度环直接启动则不需要控制环路之间的切换,从而稳定在给定转速,减少启动过程中的冲击。

3 实验结果与分析

该文研制的 $10 \text{ kV} \cdot \text{A}$ FPC 实验系统如图 4 所示。该实验系统由 $10 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 双馈发电机、飞轮、back-back 变换器、滤波器以及数字信号处理器(DSP)控制器构成。双馈电机其额定容量为 $10 \text{ kV} \cdot \text{A}$,定子侧额定电压为 800 V ,定子额定电流 9.98 A ,转子开路线电压 383.63 V ,转子额定电流 16.37 A ,双馈发电机极对数为 3,额定转速为 976.2 r/min 。连接于双馈发电机转子和电网之间的是一个电压源型背靠背变换器。

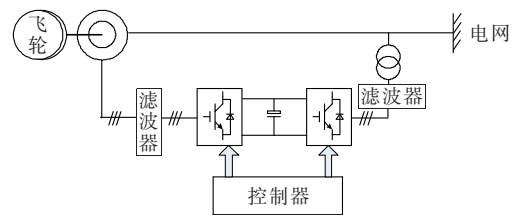


图 4 FPC 励磁控制试验系统

Figure 4 Scheme of FPC excitation control system

3.1 FPC 启动性能实验

图 5 所示为 $10 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的 FPC 实验系统直接变频启动的实验结果。实验过程为 FPC 定子端接入电网后 10 s 变频器启动,速度给定是 $1\ 100 \text{ r/min}$,无功功率给定是 0 kvar 。

由图 5 可以看出启动过程中转速匀速上升,最终稳定在速度给定值 $1\ 100 \text{ r/min}$ 。启动前后转子电压变化很小,即变频器输出的电压与转子空载电势基本相同,所以转子电流在启动时只有一个很小的冲击,之后很快稳定,由于转速稳定在同步速 $1\ 000 \text{ r/min}$ 以上,所以转子电流在转速过同步速时有换向过程;同时因为速度外环输出给定限幅的原因,在转速上升过程中 i_{qr} 保持一个恒定值,由式(8)、(10)可知,电机向电网吸收的有功功率和电磁转矩也为一个定值。当速度接近给定值 $1\ 100 \text{ r/min}$ 时,速

度外环输出给定不再是限幅值,转子电流开始减小直至稳定。图中表征无功的 i_{dr} 在启动过程中基本没有波动,说明在启动过程中,基于矢量控制原理的逆变器也可以实现有功功率和无功功率的解耦控制。

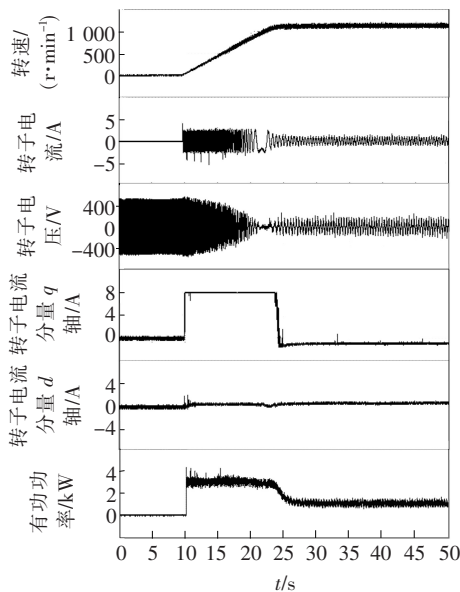


图 5 FPC 直接变频启动实验波形

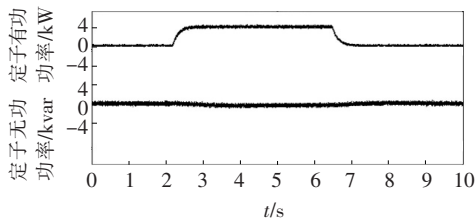
Figure 5 Experiment results of FPC starting with variation frequency

3.2 FPC 稳定运行性能实验

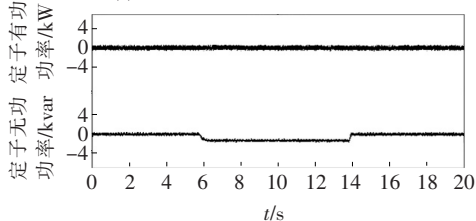
图 6 为励磁控制系统运行的实验结果,双馈电机在次同步速下运行。

图 6(a)显示定子有功功率变化时,无功功率基本没有波动。图 6(b)显示定子无功功率变化时,有功功率无显著波动。由此证明经过前馈解耦的励磁控制策略可以有效实现有功、无功功率的解耦控制。功率的动态相应速度在 250 ms 左右。图 6(c)为有功功率和无功功率同时阶跃运行波形,有功功率由 -3 kW 阶跃到 1 kW,无功功率由 -2 kvar 阶跃到 4 kW。由此可见,FPC 可以根据电力系统的需求分别与电网进行双向功率交换。

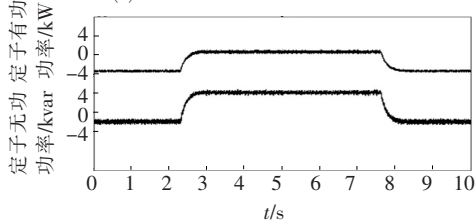
图 6(d)为有功功率 4 kW 到 0.5 kW 再到 4 kW 阶跃时,电机定子电流波形,从图中可以看出有功功率阶跃时,定子电流有相应的变化趋势。图 6(e)显示有功功率 1 kW 到 5 kW 再到 1 kW 阶跃变化时,电机转子电流波形。转子电流幅值随功率的增加而增大,转子电流频率为转差频率。



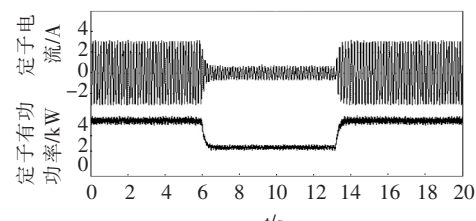
(a)定子有功功率阶跃响应



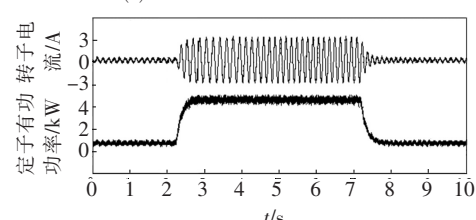
(b)定子无功功率阶跃响应



(c)有功、无功功率响应



(d)定子电流和有功功率



(e)转子电流和有功功率

图 6 FPC 运行实验波形

Figure 6 Experiment results of FPC

4 结语

针对柔性功率调节器的功能目标和运行特点,该文研制了一套适用于额定容量为 10 kV · A 的 FPC 励磁控制系统。将速度与功率 2 种控制模式相结合作为 FPC 励磁控制策略,并提出了一种变频启动的控制策略,即在速度、电流双环控制的基础上对 PI 调节器进行一定的优化。该方法无需复杂的控制策略切换,并能很好地控制启动后电机对电网

吸收的有功功率和启动时产生的转子电流冲击,同时还可以持续提供让电机升速的最大转矩和限制转子侧的有功功率。在此励磁控制系统上进行了FPC的启动、功率阶跃实验。实验结果表明,FPC启动瞬间和启动过程平稳且对电网无冲击,稳定运行时该系统可实现有功、无功功率独立大范围快速调节,以此满足电力系统主动致稳控制对于功率的要求。

参考文献:

- [1] 陈仲伟,邹旭东,段善旭,等.利用柔性功率调节器抑制电力系统功率振荡[J].电工技术学报,2012,27(3):196-204.
CHEN Zhongwei,ZOU Xudong,DUAN Shanxu, et al. Mitigating the power oscillation by the flexible power conditioner[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(3):196-204.
- [2] 杨浩,文劲宇,李刚.多功能柔性功率调节器运行特性的仿真研究[J].中国电机工程学报,2006,26(2):19-24.
YANG Hao,WEN Jinyu,LI Gang. Investigation on operation characteristics of multi-functional flexible power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(2):19-24.
- [3] 李刚,程时杰,文劲宇,等.利用柔性功率调节器提高电力系统稳定性[J].中国电机工程学报,2006,26(23):1-6.
LI Gang,CHENG Shijie,WEN Jinyu, et al. Power system stability enhancement by the flexible power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(23):1-6.
- [4] 王珍意,黄文杰,赵川,等.含分布式电源的中压柔性直流配电网研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):102-108.
WANG Zhenyi,HUANG Wenjie,ZHAO Chuan, et al. Research on flexible medium voltage DC distribution network with distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(1):102-108.
- [5] 朱慧敏,苑舜.基于功率解耦控制的虚拟同步发电机功率振荡抑制策略[J].智慧电力,2020,48(4):70-76.
ZHU Huimin,YUAN Shun. Power oscillation suppression strategy of virtual synchronous generator based on power decoupling control[J]. Smart Power,2020,48(4):70-76.
- [6] 丁有爽,肖曦.基于极点配置的永磁同步电机驱动柔性负载PI调节器参数确定方法[J].中国电机工程学报,2017,37(4):1225-1239.
DING Youshuang,XIAO Xi. Parameter tuning methods based on pole placement for PI controllers of flexible loads driven by PMSM[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(4):1225-1239.
- [7] 丁有爽,肖曦.永磁同步电机直接驱动柔性负载控制方法[J].电工技术学报,2017,32(4):123-132.
DING Youshuang,XIAO Xi. Control strategies of flexible load driven directly by permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(4):123-132.
- [8] 赵阳,邹旭东,刘新民,等.多功能柔性功率调节器控制技术[J].中国电机工程学报,2008,28(9):116-121.
ZHAO Yang,ZOU Xudong,LIU Xinmin, et al. Control technology of multi-functional flexible power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(9):116-121.
- [9] 邹旭东,刘新民,段善旭,等.储能调相功率调制系统柔性功率调节器[J].电工技术学报,2009,24(6):146-153.
ZOU Xudong,LIU Xinmin,DUAN Shanxu, et al. Flexible power conditioner of energy storage power modulation system. [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(6):146-153.
- [10] 吴跨宇,张建承,吴龙,等.基于多电平拓扑技术的新型柔性励磁系统[J].中国电力,2019,52(11):100-106.
WU Kuayu,ZHANG Jiancheng,WU Long, et al. Novel flexible excitation system based on multilevel topology technology[J]. Electric Power,2019,52(11):100-106.
- [11] 姬源,张孝,覃海,等.基于自适应反演算法的电力系统发电机励磁绕组协调控制研究[J].电网与清洁能源,2020,36(7):69-74.
JI Yuan,ZHANG Xiao,QIN Hai, et al. Research on coordination control of generator excitation winding in power systems based on adaptive inversion algorithms [J]. Power System and Clean Energy,2020,36(7):69-74.
- [12] 邹旭东.变速恒频交流励磁双馈风力发电系统及其控制技术研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [13] 陈坚.交流电机数学模型及调速系统[M].北京:国防工业出版社,1989.
- [14] Pena R,Clare J C,Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its

- application to variable-speed wind-energy generation [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1996, 143(3): 231-241.
- [15] Pena R, Clare J C, Asher G M. A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable-speed wind turbine [J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 1996, 143(5): 380-387.
- [16] Rocha N, Cavalcanti de Oliveira I A, da Silva E R, et al. Single-phase to three-phase generation system based on doubly-fed induction generator[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2017.
- [17] 邓皓, 崔双喜, 孙彦萍, 等. 孤岛微网中风光储混合建模及仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 141-147.
DENG Hao, CUI Shuangxi, SUN Yanping, et al. Study on modeling and simulation of the wind/PV/storage hybrid in islanding micro-grid system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 141-147.
- [18] 刘创华, 刘莹, 方琼. 有功注入型电压质量补偿器控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 108-114.
LIU Chuanghua, LIU Ying, FANG Qiong. Simulation research on control strategy of voltage quality compensator based on active power injection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 108-114.
- [19] Bhattarai R, Gurung N, Ghosh S, et al. Parametrically robust dynamic speed estimation based control for doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 54(6): 6529-6542.
- [20] Li M J, Wang L X, Xie Z. Control strategy of wide-speed-range doubly fed induction generator based on stator-winding short circuited in low speed mode[C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, China: IEEE, 2017.
- [21] 陈坚. 电力电子学: 电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [22] 黄杰杰, 李生虎, 孙婷婷. 基于改进动态潮流的 DFIG 风电系统层级频率模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 68-75.
HUANG Jiejie, LI Shenghu, SUN Tingting. Hierarchical frequency control for a power system with DFIG based on frequency prediction with improved dynamic power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 68-75.
- [23] 郭瑾, 王雷, 李易, 等. 永磁直驱变速恒频风电系统并网逆变器研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(10): 24-26.
GUO Jin, WANG Lei, LI Yi, et al. Research on grid-connected inverter in direct-driven permanent magnet wind power system [J]. Power Electronics, 2017, 51(10): 24-26.
- [24] 闪亮, 王小红, 牟晓春, 等. 基于虚拟同步机的风光储一体系统运行控制研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(1): 89-95.
MIN Liang, WANG Xiaohong, MOU Xiaochun, et al. Operation and control research of integrated distributed generation system based on virtual synchronous generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1): 89-95.
- [25] 张兰红, 胡育文, 黄文新. 异步电机启动/发电系统启动向发电的转换研究[J]. 航空学报, 2005, 26(3): 356-361.
ZHANG Lanhong, HU Yuwen, HUNG Wenxin. Research on the conversion from starting mode to generating mode of induction machine starter/generator system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(3): 356-361.
- [26] 李刚, 文劲宇, 程时杰, 等. 多功能柔性功率调节器的启动和并网研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 17-22.
LI Gang, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Investigation on start and cut-in of the multi-function flexible power conditioners[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 17-22.
- [27] 陈昕, 王雪帆. 基于无刷双馈发电机的船舶独立发电系统励磁控制和性能分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 120-129.
CHEN Xin, WANG Xuefan. Excitation control and performance analysis for BDFIG-based ship stand-alone power generation system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 120-129.