

扩展 MPPT 运行区间的双馈风电机组智能双模控制策略

刘其辉, 高 瑜, 郭天飞, 唐光钰

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206)

摘要: 为扩展双馈型感应发电机(DFIG)最大功率点跟踪运行区间,提高其在低风速区间的发电效率,首先,文中提出了一种智能双模控制策略,通过机侧变流器控制策略的调整以及必要的开关切换,DFIG 可根据风速不同自动地运行于两种模式:传统 DFIG 模式及 DFIG 定子短路模式。然后,针对模式切换过程时间短的需求以及冲击大、影响久的特点,重点研究了文献鲜有提及又极为重要的模式柔性切换控制方法,特别是双向模式切换的具体流程、机侧变流器控制策略以及发电机负载的选取等。最后,基于 RT-lab 的硬件在环仿真结果表明,所提控制策略较好地发挥了 DFIG 的成本优势与全功率型发电机的宽变速范围优势,并实现了两种模式的快速、柔性切换。

关键词: 双馈型感应发电机; 双模控制; 模式切换; 低风速

0 引言

随着以风电为主的可再生能源发电占比不断提高,高比例可再生能源电力系统已成为研究热点^[1-4]。与全功率型发电机(full power generator, FPG)相比,双馈型感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)所需变流器容量小、发电机体积小、成本低,因而得到了广泛应用,但同时它的缺陷也较为明显——由于变速范围受限导致低风速下不能追踪最大功率,发电效率低。

调查发现,负荷集中区年平均风速约为 DFIG 追踪最佳功率点运行区的最低风速,随着分散式风电的不断发展,提高 DFIG 在低风速下的发电效率具有重要意义。文献[5-6]通过增加设备提升 DFIG 发电量,在提高系统发电效率的同时,大大增加了成本;文献[7-8]则通过改进机组控制策略降损增效,扩大机组运行风速范围,成本极低,但效果不明显。

文献[9]通过改变机组结构和控制策略来提高 DFIG 发电效率,在低风速下将 DFIG 定子短路(stator short circuit, SSC)使其运行于感应发电机状态,这为提升双馈风电机组效率提出了一种所谓双模式(DFIG 模式和 SSC 模式,以下简称双模)运行的思路 and 方案。文献[10]介绍了双模机组的稳态

模型,通过仿真实验验证了双模控制策略的有效性;文献[11]通过分析 SSC 模式下定子磁链与机组转速之间的关系,提出一种获取最佳定子磁链参考值的方法。双模式切换伴随着机组结构的改变和运行方式的变化,是一个暂态过程,若控制或操作不当,将影响模式切换后机组运行的稳定性,极易出现电气量的瞬时冲击,甚至导致机组损坏。而文献[9-10]均没有考虑模式切换的动态过程,文献[11]对 DFIG 模式切换至 SSC 模式进行了仿真,但未介绍具体切换流程。

综上所述,目前 DFIG 的双模控制策略虽然得到了一定的关注,但研究主要集中于双模控制的基本方法和思路,对不同模式下具体控制方法,尤其是模式切换时的动态过程和应对措施关注较少。为此,本文研究了双模运行方式和相应的控制策略,重点研究了模式切换瞬间的冲击问题,填补了双模控制在实际工程应用中的研究缺口。针对切换过程时间短的需求以及冲击大、影响久的特点,给出了一种柔性切换模式的控制方法:DFIG 模式切换至 SSC 模式时,先在定子端接入电阻型独立负载并调节机侧变流器(machine side converter, MSC),消耗发电机能量,降低机端电压,为 SSC 建立条件;SSC 模式切换至 DFIG 模式时,先在定子端并联电阻负载,通过 MSC 控制发电机端电压使其满足并网条件,恢复 DFIG 模式运行。最后,硬件在环仿真实验验证本文所提方法在提升发电效率和抑制模式切换冲击方面的效果。

收稿日期: 2019-02-03; 修回日期: 2019-06-10。

上网日期: 2019-08-06。

国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904000);国家电网公司科技项目(SGJB0000TKJS1801242)。

1 双馈风电机组的智能双模控制策略

1.1 双模运行效率的理论分析

目前风力发电系统中常用的发电机包括 DFIG 和 FPG。直驱永磁型发电机是典型的全功率型风力发电机,其调速范围为 0%~150% 额定转速^[12],可以在较宽的风速范围内实现最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)。对于大功率直驱风电机组,必须通过增加发电机的极对数以及发电机体积来增大转矩和提高效率,增加了成本。与直驱发电系统相比,双馈发电系统中变流器容量随转差率的增大而提高,通常将转速限制在 70%~130% 同步转速之间,无法在更宽的风速范围内跟踪最大功率点;但因其损耗随功率变化不大,故高风速下运行效率更高^[10]。由两种典型风电系统的效率特性曲线(见附录 A 图 A1)可知,高功率运行条件下,DFIG 效率更高;而低功率运行条件下,FPG 更高效。

DFIG 的运行特性曲线及低风速区间 DFIG 和 FPG 的运行特性分析如附录 A 图 A2 所示。为了充分发挥 DFIG 的成本优势与 FPG 的变速范围宽的优势,基于上述分析,本文采用了智能双模运行提升效率的思路和方案(如附录 A 图 A3 所示)。由图 A3(a)可知,将定子短接,DFIG 就相当于一台“定子旋转,转子静止”且由转子变流器实现全功率变换输出的感应发电机。当机组运行于 MPPT 区间对应的风速范围 v_{\min} 至 v_{\max} 时,图 A3(b)中开关 K 位于位置 a,双馈风电机组运行于 DFIG 模式,功率沿虚线路径由定、转子输出,其中转子侧功率经网侧变流器(GSC)变换输出;当风速低于 v_{\min} 时,开关 K 位于位置 c,机组运行于 SSC 模式,功率全部沿点划线路径输出,此时双馈风电机组相当于一台 FPG;风速再次高于 v_{\min} 时,将发电机重新切回 DFIG 模式;图 A3(b)中开关 K 位于位置 b 时接入电阻型负载同时调节 MSC 控制策略,可实现双模柔性切换,降低过渡过程的冲击。

现有大功率硬件开关仅能够单向或双向导通电流,无法满足图 A3 中开关 K“单刀三掷”的要求,本文借鉴电机软启动技术^[13]常用的基于晶闸管的电子式开关,采用 9 只双向晶闸管(或反并联晶闸管)构成可三路径双向导通的统一三相开关,通过触发脉冲控制每只晶闸管的双向导通,可自动调整双模风电机组的运行结构。

1.2 两种模式下变流器的控制策略

两种模式下对应的 GSC 控制策略是相同的,采

用普遍应用的基于电网电压定向的矢量控制技术^[14];两种模式下 MSC 控制策略则存在较大的不同,本文重点对其进行讨论。

1.2.1 DFIG 模式下 MSC 控制策略

在 DFIG 变流器控制中,MSC 一般采用基于定子磁链定向的矢量控制策略(见附录 A 图 A4),此时,若分别调节 DFIG 定子电流的 d 和 q 轴分量 i_{sd} 和 i_{sq} ,可实现对 DFIG 输出功率 P 和 Q 的解耦控制,最终输出两相静止坐标系下的参考电压 u_{α}^* 和 u_{β}^* ,经空间矢量脉宽调制(SVPWM)输出调制信号,控制 MSC 各桥臂绝缘栅双极型晶体管(IGBT)。DFIG 模式下 MSC 的矢量控制技术已经成熟^[14],不再赘述。

1.2.2 SSC 模式下 MSC 控制策略

SSC 模式下 MSC 亦采用定子磁链定向的矢量控制策略,将 dq 坐标系的 d 轴定于定子磁链矢量 ψ_s 方向,定子磁链 q 轴分量为 0,即 $\psi_{sd} = \psi_s, \psi_{sq} = 0$ 。与 DFIG 模式不同的是,此时 dq 坐标系转速不等于电网同步转速 ω_0 ,而以 ψ_s 的转速 ω_1 旋转,此时坐标系关系见附录 A 图 A5。

整理 SSC 模式下发电机(电动机惯例)电压方程、磁链方程可得定子磁链 ψ_s 和电磁转矩 T_e 分别为:

$$\psi_s = \frac{L_m}{1 + \tau_s D} i_{rd} \quad (1)$$

$$T_e = -n_p \frac{L_m}{L_s} \psi_s i_{rq} \quad (2)$$

式中:定子时间常数 $\tau_s = L_s / R_s$, R_s 和 L_s 分别为发电机定子绕组的电阻和自感; L_m 为 dq 坐标下定、转子绕组间的互感; i_{rd} 和 i_{rq} 分别为转子电流 i_r 在 d 轴和 q 轴分量; n_p 为发电机极对数; D 为微分算子。

由式(1)和式(2)可知,改变转子励磁电流分量 i_{rd} 可控制定子磁链,改变转矩电流分量 i_{rq} 可控制电磁转矩,从而实现励磁-转矩的解耦控制。据此,可设计 MSC 矢量控制策略,见附录 A 图 A6。

此外 SSC 模式下有:

$$\omega_1 = \frac{L_m i_{rq}}{\tau_s \psi_s} \quad (3)$$

由式(3)可知,若 ψ_s 保持恒定, ω_1 与 i_{rq} 成正比。由式(1)和式(3)可设计如附录 A 图 A7 所示的电流型磁链观测器。

2 模式的柔性切换控制方法

图 1 所示的风电系统是通过切换开关和改变

MSC 控制策略来改变运行模式的,但由于开关动作前、后发电机的运行状态不相同,直接切换开关或简单改变 MSC 控制策略会导致较大的瞬时电流冲击,延长暂态过渡过程,影响机组运行的稳定性。因此,有必要研究两种模式的柔性切换技术,降低模式改变暂态过程的冲击。

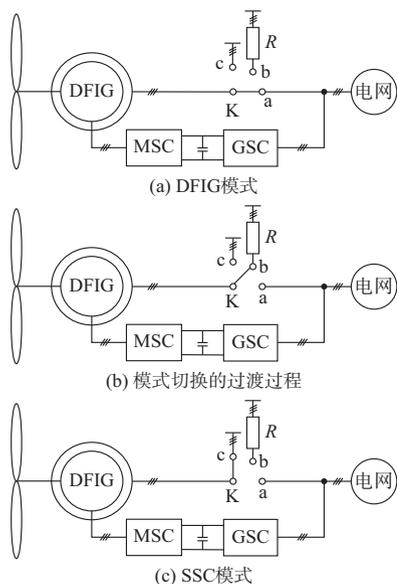


图 1 DFIG 风电系统的不同运行状态
Fig. 1 Different operation states of DFIG wind power system

2.1 DFIG 模式切换至 SSC 模式

2.1.1 柔性切换控制方法

一般中高速风况下,机组运行于 DFIG 模式,图 1 中开关 K 位于位置 a。当风速低于 v_{\min} 进入低风速区间时,机组需切换为 SSC 模式运行,若直接切换开关至位置 c 短接定子,DFIG 机端电压将瞬间降为 0,相当于机端发生三相短路故障,导致定子端过电流和电磁转矩剧烈波动,使系统承受巨大的电气和机械应力,甚至会损坏机组;同时,转子感应出的过电流、过电压带来的不平衡能量经 MSC 后,一部分经 GSC 输入电网,另一部分对直流母线电容充电,造成直流母线电压泵升,威胁变流器器件及直流母线电容的安全^[15]。

本文兼顾抑制电流冲击和减少模式切换过渡时间的需要,当 DFIG 模式(图 1(a))切换至 SSC 模式(图 1(c))时,先将开关 K 切换为位置 b,在 DFIG 定子端并联负载 R,同时 MSC 调整为独立负载运行控制策略,以消耗发电机定子端能量并控制定子端电压由电网电压逐渐降低,此时系统拓扑如图 1(b)所示。当定子端相电压 U_1 降至 0 时,再切换开关 K 于位置 c 将 DFIG 定子直接短路,同时 MSC 调整为

SSC 模式下的控制策略,需要注意的是,此时转子角速度 ω_r 及定子磁链 ψ_s 的给定值须由当前的运行值按一定速率缓慢增至 SSC 模式所需参考值,模式切换后的系统结构如图 1(c)所示,风电机组由 DFIG 模式平稳过渡至 SSC 模式。

2.1.2 独立负载控制策略

在 DFIG 到 SSC 模式的切换过程中,接入独立负载 R 的目的是能控制和降低发电机定子电压,为最终短接定子提供条件,减少暂态冲击。

由发电机(电动机惯例)的磁链方程可得 dq 轴定子电流分量 i_{sd} 和 i_{sq} 分别为:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{L_s}(\psi_s - L_m i_{rd}) \\ i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

设 DFIG 定子等效励磁电流为 $i_{sd,eq}$,则满足如下关系式。

$$i_{sd,eq} = \frac{\psi_s}{L_m} = \frac{U_s}{\omega_0 L_m} \quad (5)$$

式中: U_s 为定子端相电压幅值。

由式(5)可得,调节 $i_{sd,eq}$ 可以改变 U_s 。将式(5)代入式(4)可得 $i_{sd,eq}$ 与 i_{rd} 有如下关系。

$$i_{rd} = \frac{L_s}{L_m} i_{sd,eq} - i_{sd,eq} \quad (6)$$

由发电机(电动机惯例)的转子电压方程及式(4)可得:

$$\begin{cases} u_{rd} = u_{rd}' - \Delta u_{rd} \\ u_{rq} = u_{rq}' + \Delta u_{rq} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $u_{rd}' = (R_r + a_2 p) i_{rd}$, $u_{rq}' = (R_r + a_2 p) i_{rq}$, $\Delta u_{rd} = a_2 \omega_s i_{rq}$, $\Delta u_{rq} = a_1 \omega_s \psi_s + a_2 \omega_s i_{rd}$, 其中 $a_1 = L_m/L_s$, $a_2 = L_r - L_m^2/L_s$, $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$, R_r, L_r, ω_r 分别为发电机转子电阻、电感和转速。

根据上述分析,可设计出如图 2 所示的基于定子磁链定向的独立负载控制策略,其中,定子电压参考值 U_s^* 须由电网相电压幅值 U_g 按一定速率逐渐降为 0; $u_{g\alpha}$ 和 $u_{g\beta}$ 分别为电网相电压 u_g 在 $\alpha\beta$ 轴的分量; $u_{r\alpha}$ 和 $u_{r\beta}$ 分别为发电机转子电压在 $\alpha\beta$ 轴的分量; i_{rd} 和 i_{rq} 分别为 i_r 在 dq 轴的分量;上标 * 表示对应变量的参考值; U_{dc} 为直流母线电压; θ_0 为 d 轴与 α 轴间的空间位置角; θ_r 为转子空间位置角; $\theta_s = \theta_0 - \theta_r$;PLL 表示锁相环;PI 表示比例-积分控制。

2.2 SSC 模式切换至 DFIG 模式

2.2.1 柔性切换控制方法

当风速升高至 v_{\min} 以上时,机组需要从 SSC 模式恢复为 DFIG 模式。若直接将图 1 中的开关切换

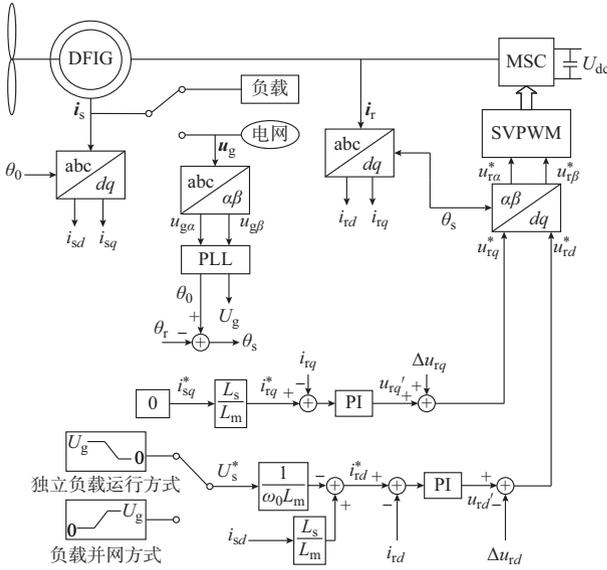


图 2 独立负载运行 MSC 控制策略
Fig. 2 Control strategy of MSC in independent load operation

为位置 c, 相当于发电机采用直接并网方式接入电网, 并网瞬间电流幅值达额定电流的 4~5 倍, 不但会对机组造成冲击, 而且还会导致电力系统电压瞬时下降, 引起低电压继电器动作。为完成 SSC 到 DFIG 模式的柔性切换, 本文借鉴双馈风电机负载并网方式^[16-17]。

类比 DFIG 到 SSC 模式的切换过程, 当 SSC 到 DFIG 模式切换时, 也是通过将开关 K 置于位置 b 先在 DFIG 定子端接入负载 R, MSC 调整为负载并网控制策略。此时, 需要注意的是定子电压给定值须由 0 缓慢增至 U_g , 调节机端电压以满足同期条件, 系统结构如图 1(b) 所示; 定子端电压 u_1 满足并网条件瞬间切换开关 K 至位置 a 将 DFIG 定子并入电网, 并网后 MSC 调整为 DFIG 模式下的控制策略, 同样有功功率的给定值须由当前运行值按一定速率增至 DFIG 模式所需参考值, 无功功率参考值可直接给定为 0, 系统结构如图 1(a) 所示。至此, 风电机组由 SSC 模式平稳过渡至 DFIG 模式。

2.2.2 负载并网控制策略

DFIG 负载并网控制策略与独立负载控制策略基本相同, 唯一的区别是电压指令的生成(如图 2 所示), 此时须根据电网信息生成负载电压指令以满足同期并网条件, 并控制定子电压按一定速率由 0 逐渐增至该指令 U_g ; 独立负载控制策略是控制电压指令由当前值减为 0。

2.3 负载 R 的设计

由 2.2 节分析可知, 双馈型风电机组的独立负

载运行方式与负载并网方式基本相同, 属于模式切换时的过渡性运行方式, 除了设计控制策略外, 还需要设计负载 R, 包括功率的选取和阻值的设计。

2.3.1 电阻功率的选取

本文接入负载 R 的原理类似发电机失步保护接入灭磁电阻, 因此负载 R 的电阻功率的选取可采用线性灭磁电阻热容量的选择方法^[18]。

通常线性电阻的热容量 W 按式(8)计算, 其中 P_R 为电阻长期通过的功率, U_R 和 I_R 分别为电阻的额定电压和额定电流^[19]。

$$W = \int P_R dt = \int U_R I_R dt \quad (8)$$

本文接入负载 R 的工况与式(8)有所差异, 表现为通过 R 的电流为短时电流, 幅值较大但时间短暂, 因此电阻热容量较小, 可认为全部用于加热电阻本身, 可忽略不计。实际工程应用中可通过综合考虑发电机参数、时间常数、负载电阻等, 根据热平衡方程选取合适的电阻, 保证在模式切换瞬间负载温升低于允许值并具有一定安全裕量。

2.3.2 电阻阻值的设计

R 的大小不仅将直接决定过渡过程的快慢和电流冲击的大小^[20], 还会影响模式切换时风电机组的功率平衡^[17, 21], 本文从暂态电流约束和输出功率约束两方面, 讨论 R 值的设计。

2.3.2.1 发电机暂态电流约束

1) 冲击幅值约束

设 $t = t_0$ 时发电机定子经电阻 R 短路, 此时 DFIG 动态等效电路的矢量模型如附录 A 图 A8 所示, 图中 L_{ls} 和 L_{lr} 分别为发电机定、转子绕组的漏感; i_s 为定子电流矢量; u_r 为转子电压矢量; ψ_r 为转子磁链矢量。互感 L_m 一般较大, 励磁支路可视为开路, 则有:

$$(R + R_s + R_r + j\omega_0 L_{ls} + j\omega_s L_{lr}) i_s = u_r + j(\omega_s \psi_r - \omega_0 \psi_s) \quad (9)$$

通常双馈风电机组过流能力约为 5 倍额定电流 I_N , 因此需满足 $|i_s| \leq 5I_N$ 。整理式(9)可得:

$$\left| \frac{u_r + j(\omega_s \psi_r - \omega_0 \psi_s)}{R + R_s + R_r + j\omega_0 L_{ls} + j\omega_s L_{lr}} \right| \leq 5I_N \quad (10)$$

当机组运行于 SSC 模式(参数见附录 A 表 A1) 时, 由式(10)计算可得 $R > 0.22 \Omega$ 时, 定子暂态冲击电流幅值满足机组过流能力, 为进一步减小冲击电流可继续增大 R。

2) 衰减时间约束

已知 DFIG 定子电压矢量模型为:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \psi_s \quad (11)$$

在 $t = t_0$ 前后的定子磁链 ψ_s 为:

$$\psi_s = \begin{cases} \frac{U_g}{j\omega_0} e^{j\omega_0 t} & t < t_0 \\ \frac{U_g}{j\omega_0} e^{j\omega_0 t_0} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s'}} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\tau_s' = L_s / R_{\Sigma s}$ 为定子时间常数, 其中 $R_{\Sigma s} = R_s + R$, $L_s = L_{ls} + L_m$ 。

由式(12)可知, ψ_s 以同步转速 ω_0 旋转, 其幅值按定子时间常数 τ_s' 衰减, 因此发电机定子发生短路时, R 越大, 定子电流收敛得越快。工程上通常认为电气冲击经 $3\tau \sim 5\tau$ 衰减为 0, 由附录 A 表 A1 模型参数计算得 $\tau_s' = 1.38$ s, 无法满足模式切换短暂的需求, 因此需增大 R 缩短过渡过程。若要求 0.1 s 内完成模式切换, 计算得须设计负载 R 阻值大于 0.47 Ω 。

2.3.2.2 风力机输出功率约束

设电网相电压有效值为 U_{ga} , 星形负载各相阻值为 R , 则 DFIG 定子输出功率为:

$$P_{out} = 3 \frac{U_{ga}^2}{R} \quad (13)$$

在 MPPT 运行范围内, DFIG 输入机械功率等于风力机输出最大功率^[19], 即 $P_o = P_{opt} = 0.5\rho S_w v^3 C_{p,max}$, 则忽略相关损耗后 DFIG 定子输出的功率为:

$$P_s = \frac{P_{opt}}{1-s} = \frac{0.5\rho S_w v^3 C_{p,max}}{1-s} \quad (14)$$

式中: s 为转差率; ρ 为空气密度; S_w 为风轮扫略面积; v 为风速; $C_{p,max}$ 为最大风能利用系数。

令式(13)和式(14)相等, 可得:

$$R = \frac{3(1-s)U_{ga}^2}{0.5\rho S_w v^3 C_{p,max}} \quad (15)$$

分析式(15)可知, 由机组参数、状态参数、电网参数便可确定 R 值。当机组运行于 SSC 模式(模型参数见附录 A 表 A1)时, 由式(15)计算得 $R = 1.24$ Ω , 若计及损耗, R 将略小于计算值。

综上所述, 依据附录 A 表 A1 机组参数, 负载 R 阻值应在 0.47~1.24 Ω 范围内, 本文采用 $R = 1$ Ω 。

3 智能双模控制策略的整体逻辑

附录 A 图 A9 为本文所提智能双模控制策略及模式柔性切换方法的整体逻辑。在 v_{min} 至 v_{max} 的风速范围内, 双馈风电机组运行于 DFIG 模式, 系统结构如图 1(a)所示, MSC 采用附录 A 图 A4 所示控

制策略; 为避免风速在 v_{min} 上下波动开关频繁切换对系统造成恶劣影响, 本文设计当风速持续 1 min 低于 v_{min} 时再切换图 1 中开关 K 至位置 b, 此时系统结构如图 1(b)所示, MSC 调整为如图 2 所示控制策略, 为降低冲击, 定子电压给定值由电网电压逐渐降低; 满足开关切换条件后, 开关 K 调至位置 c, 系统结构如图 1(c)所示, MSC 调整为如附录 A 图 A6 所示控制策略, 此时转子角速度 ω_r 及定子磁链 ψ_s 的给定值由独立负载运行值缓慢增至 SSC 模式所需参考值, 待机组稳定运行于 SSC 模式, 完成由 DFIG 模式向 SSC 模式的切换。

当风速再次持续 1 min 高于 v_{min} 时, 图 1 中开关 K 由位置 c 切换至位置 b, 此时系统结构如图 1(b)所示, MSC 采用如图 2 所示控制策略, 定子电压给定值由 0 增至电网电压; 定子端电压满足并网条件后开关 K 切换至位置 a, 此时系统结构如图 1(a)所示, MSC 调整为如附录 A 图 A4 所示控制策略, 有功功率给定值由负载并网运行值缓慢增至 DFIG 模式所需参考值, 无功功率参考值直接给定为 0, 系统重新运行于 DFIG 模式。

4 仿真实验

为验证所提控制方法的有效性, 本文采用某实际双馈风电机组数据, 基于 RT-lab(OP5700)实时仿真平台及 RCP(NI PXI)控制器, 搭建了单台双馈风电机组智能双模控制模型, 模型参数见附录 A 表 A1, 仿真平台如附录 A 图 A10 所示。

由附录 A 表 A1 可得 DFIG 的 MPPT 风速范围为 5.5~11 m/s, 故设置仿真风速变化如图 3 所示, 验证智能双模控制策略及模式柔性切换控制方法的效果, 初始风速为 7 m/s, 4 s 时突变为 5 m/s, 10 s 时恢复为 7 m/s, 仿真持续 15 s。为使仿真结果直观易读, 实时仿真实验中 4 s 及 10 s 时直接进行模式切换, 不考虑附录 A 图 A9 中 1 min 的延时。

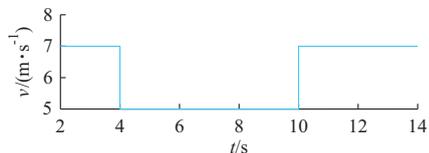


图 3 风速 v 的仿真波形

Fig. 3 Simulation waveform of wind speed v

4.1 智能双模控制效果验证

图 4 展示了 3 种风速(5, 4.5, 4 m/s)下风电系统分别运行于 DFIG 模式和 SSC 模式(图中蓝色和红色曲线)时输出有功功率的曲线。

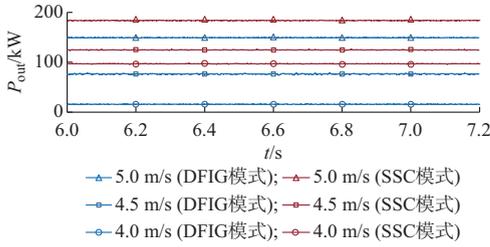


图 4 两种模式下风电机组输出功率 P_{out} 对比
Fig. 4 Comparison of output power P_{out} of wind turbines in two modes

由附录 A 表 A1 可知,该 3 种风速下 DFIG 模式风力机保持恒转速 ω_{min} 运行,无法追踪最大风能,而 SSC 模式风力机变转速可实现 MPPT 控制。仿真显示 5 m/s 风速下 SSC 模式机组输出功率约为 180 kW,DFIG 模式约为 147 kW;4.5 m/s 风速下 SSC 模式机组输出功率约为 133 kW,DFIG 模式机组输出功率约为 78 kW;4 m/s 风速下 SSC 模式机组输出功率约为 93 kW,DFIG 模式约为 18 kW。可见智能双模控制策略明显增大了机组出力,充分发挥了 FPG 的低风优势,同时对比发现风速越低,该控制策略提高机组出力效果越明显。

4.2 模式柔性切换效果验证

图 5(a)至(g)为预设风况下双模控制、切换的仿真结果。由图 5(a)可知,4 s 时切换开关至位置 b,发电机定子相电压由额定值平滑降至 0(耗时 0.09 s),4.1 s 时切换开关至位置 c,此时定子端电压为 0;10 s 时切换开关至位置 b,定子端电压由 0 平滑上升,10.1 s 时满足同期条件并网,切换开关至位置 a,并网后电压波形与电网保持一致;由图 5(b)可知,过渡过程中发电机定子端最大冲击电流出现在 4.1 s,幅值为 4 590 A,约为额定电流的 2.61 倍,远低于双馈机组 5 倍额定电流的过流能力。4 s 时发电机定子与电网断开连接,图 5(c)并网点电流 i_{abc} 不受冲击影响,图 5(b)中的冲击电流由负载 R 吸收;而 10.1 s 时发电机定子并网,图 5(b)冲击电流进入并网点,使其电流幅值达 1 940 A,约为额定电流的 1.1 倍,同时受 i_{abc} 直接影响的机组输出有功功率也发生相应变化,如图 5(d)所示。由图 5(c)可见,机组切换至 SSC 模式后 i_{abc} 经 1.5 s 波动后保持稳定,切换至 DFIG 模式后经 1.2 s 波动后保持稳定;由图 5(d)和(e)可知,整个过程中机组保持恒功率因数运行,输出无功功率 Q_{out} 在 0 附近波动,4 s 时 P_{out} 由 0.5 MW 经 1.5 s 稳定在 0.18 MW,10 s 时经 1.2 s 恢复至 0.5 MW;图 5(f)为发电机转子转速 ω_r' (以同步转速 ω_0 为基准),由波形

可知,4 s 时 ω_r' 由 0.76(标么值)平滑过渡至 0.55,10 s 时平滑升回 0.76;由图 5(g)可知,实验过程中直流母线电压基本保持 1 150 V 不变,波动范围仅为 1 080~1 223 V。

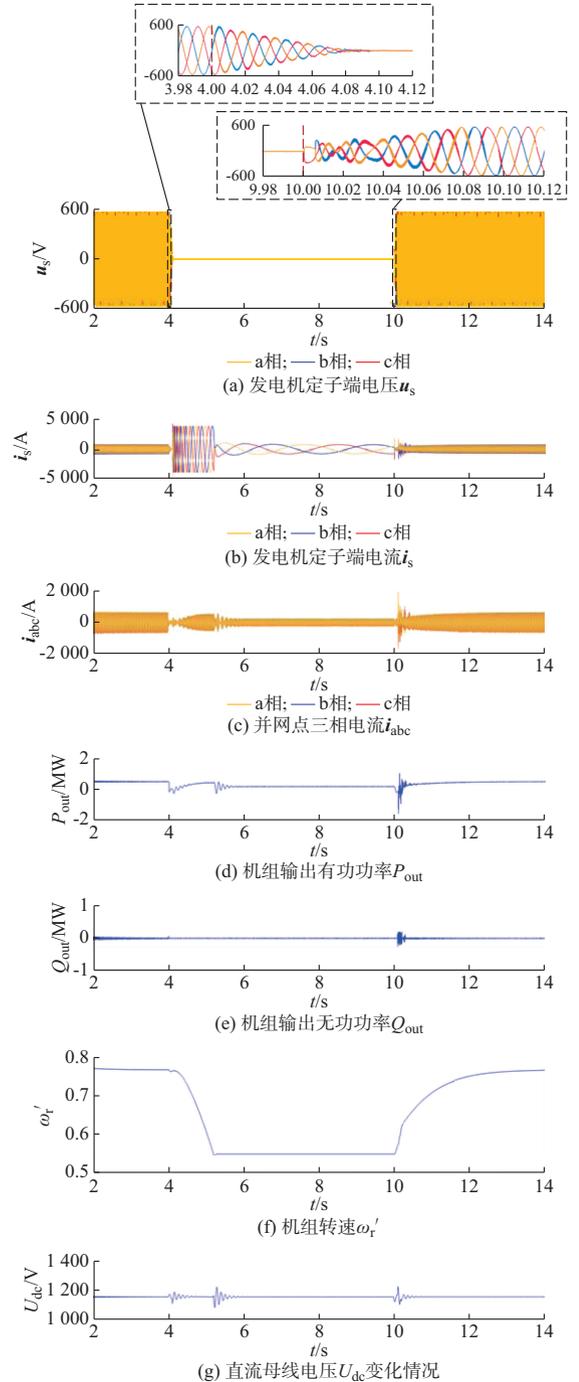


图 5 预设风况下双模控制、切换的仿真结果
Fig. 5 Simulation results of dual-mode control and switch in pre-set wind condition

可见,本文提出的模式的柔性切换控制方法能够有效缩短机组的过渡过程,抑制电气量瞬时冲击,

在提高机组发电效率的同时,实现了机组运行模式的柔性切换,避免了冲击对电网和机组本身的影响。

4.3 负载阻值效果验证

为验证负载阻值选取的准确性,机组由 SSC 模式切换至 DFIG 模式时 R 取值为 0.01, 0.1, 1, 10 Ω , 对比便于观察的并网功率波形。由附录 A 图 A11 得出并网瞬间的功率冲击幅值的标幺值为 16, 4.6, 3.2, 3.9(以额定功率 1.5 MW 为基准), 显然 R 取为 1 Ω 时功率冲击最小, 与计算结果相符。

5 结语

为解决低风速下 DFIG 发电效率低的问题, 本文采用了智能双模控制策略, 重点研究了文献中较少提及又极为重要的双模柔性切换问题, 提出一种模式柔性切换控制方法。本文特点及主要成果如下。

1) 通过开关切换以及 MSC 控制策略配合, 实现了机组运行模式的智能和柔性切换, 扩展了 MPPT 运行范围, 提高了低风速下 DFIG 发电效率。

2) 仅需借助简单的开关、电阻元件及 MSC 控制策略的调整, 实现了双模式平滑、快速切换, 降低了模式切换对电网和机组本身的影响, 具有较好的经济性和实用性。

3) 详细论述了过渡过程发电机负载的选取、具体切换流程及 MSC 控制策略等技术细节, 填补了双模控制在实际工程应用中的研究缺口。

本文采用半实物实验验证了所提控制方法的有效性, 然而对于智能双模控制在实际工程应用中将面临的问题思考较少, 若在实践中进一步探索切入风速的降低空间、模式切换的控制方式及该运行方式的不足或隐患等, 将对实际工程上提高 DFIG 的发电效率具有重要意义。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 肖峻, 康重庆. 特约主编寄语[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 1. DOI: 10.7500/AEPS20180709009.
- [2] 叶林, 陈小雨, 靳晶新, 等. 考虑风功率密度和风向特征的风能资源 MCP 评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 24-34. DOI: 10.7500/AEPS20180710007.
- [3] 吴耀武, 汪昌霜, 姜素华, 等. 计及风电-负荷耦合关系的含大规模风电系统调峰运行优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 163-169. DOI: 10.7500/AEPS20161229006.
- [4] DAVID N, ALIPRANTIS D C. Improved efficiency of DFIG wind energy conversion systems by operating in the rotor-tied configuration[C]// 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), September 2-5, 2014, Berlin, Germany.
- [5] 缪瑞平, 高松筠. 双模式并网方法、控制装置及系统: 104269884A[P]. 2015-01-07.
- [6] MIAO Ruiping, GAO Songjun. Dual mode grid connection method, control device and system: 104269884A[P]. 2015-01-07.
- [7] RUDRARAJU V R R, CHILAKAPATI N, SARAVANA ILANGO G. A stator voltage switching strategy for efficient low speed operation of DFIG using fractional rated converters [J]. Renewable Energy, 2015, 81: 389-399.
- [8] KARAKASIS N, TSIOMAS E, JABBOUR N, et al. Optimal efficiency control in a wind system with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 356-368.
- [9] KARAKASIS N, JABBOUR N, TSIOMAS E, et al. Efficiency increase in a wind system with doubly fed induction generator[C]// IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 23-26, 2016, Florence, Italy.
- [10] BALOGUN A, OJO O, OKAFOR F. Shorted stator induction generator for low wind speed power application[C]// IEEE PES General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA.
- [11] RUDRARAJU V R R, NAGAMANI C, ILANGO G S. A control scheme for improving the efficiency of DFIG at low wind speeds with fractional rated converters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 70: 61-69.
- [12] BALOGUN A, OJO O, OKAFOR F. Efficiency optimization of doubly-fed induction generator transitioning into shorted-stator mode for extended low wind speed application[C]// Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 10-13, 2014, Istanbul, Turkey.
- [13] 李杰. 直驱式风力发电变流系统拓扑及控制策略研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [14] LI Jie. The research on topology and control strategy of conversion system for direct-drive wind power generation[D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.
- [15] 刘利, 王栋. 电动机软启动器实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

- 版社, 2010.
- LIU Li, WANG Dong. Practical technology of motor soft starter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [14] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- LIU Qihui. The investigation of operation and control for a variable-speed constant-frequency wind power generation system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [15] 贺益康, 徐海亮. 双馈风电机组电网适应性问题及其谐振控制解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5188-5203.
- HE Yikang, XU Hailiang. The grid adaptability problem of DFIG-based wind turbines and its solution by resonant control scheme [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5188-5203.
- [16] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 交流励磁变速恒频风力发电系统的运行与控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 129-136.
- LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. Operation and control of AC-excited variable-speed constant-frequency wind power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 129-136.
- [17] 刘其辉, 谢孟丽. 双馈式变速恒频风力发电机的空载及负载并网策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 60-67.
- LIU Qihui, XIE Mengli. Strategies of grid-connection of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator with no-load and with load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 60-67.
- [18] 吴启仁. 三峡发电机失步保护及励磁系统应用技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- WU Qiren. The research of application technology of the Three Gorges generator out of step protection and exciting system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [19] 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.
- XU Qipin, YANG Ming, XU Rong. Selecting appropriate de-excitation resistors for turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 125-129.
- [20] LÓPEZ J, SANCHIS P, ROBOAM X, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.
- [21] 曾志勇, 王清灵, 冯婧. 变速恒频双馈风力发电负载并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 33-37.
- ZENG Zhiyong, WANG Qingling, FENG Jing. Study on the load cutting-in control of the variable-speed constant-frequency (VSCF) wind-power generator[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 33-37.

刘其辉(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 风力发电运行控制与并网技术. E-mail: liuqihuifei@163.com

高瑜(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 双馈型感应发电机运行与控制. E-mail: 374717659@qq.com

郭天飞(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 双馈型感应发电机运行与控制. E-mail: 963760030@qq.com

(编辑 鲁尔姝)

Intelligent Dual-mode Control Strategy for Extending MPPT Operation Interval of DFIG Based Wind Turbines

LIU Qihui, GAO Yu, GUO Tianfei, TANG Guangyu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: To extend the operation interval of maximum power point tracking (MPPT) of doubly-fed induction generator (DFIG) and improve the power generation efficiency with low wind speed interval, an intelligent dual-mode control strategy is firstly proposed. With adjustment of the strategy on the machine side converter (MSC) and the necessary switchover, the DFIG can automatically operate in two modes depending on the wind speed: the traditional DFIG mode and the stator short-circuit (SSC) mode. Then, to satisfy the requirement of short switching time and address the issues including huge impacts and long-time influences during the mode-switching process, this paper focuses on the flexible mode switching control methods, especially the specific procedure of bidirectional mode switching, MSC control strategy and the selection of generator load, which is rarely studied in previous literature. Finally, the hardware-in-the-loop experimental evaluation based on the RT-lab demonstrates that the proposed strategy effectively takes advantages of both the low cost of DFIG and the wide speed range of full-power generator, which achieves efficient and flexible switching between the two modes.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0904000) and State Grid Cooperation of China (No. SGJB0000TKJS1801242).

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); dual-mode control; mode switching; low speed