

DOI: 10.7667/PSPC180539

双馈风电机组 dc-link 电压的直接电容电流控制策略

高仕红, 崔佳咪, 胡唐超

(湖北民族大学信息工程学院, 湖北 恩施 445000)

摘要: 传统 GSC 双闭环控制中存在电压外环对 dc-link 电压波动抑制响应慢及电流内环对前馈补偿延时的问题。对此提出一个 dc-link 电容电流直接控制的 GSC 单闭环控制策略。控制策略中引入的前馈补偿直接施加在 GSC 控制电压的节点上, 消除了电流内环对扰动前馈补偿的延时。同时, 对外界扰动动态的前馈补偿采用了一个“跟踪-微分器”技术。在 Matlab/Simulink 仿真平台中构建了 GSC 控制策略的研究模型, 研究了两种典型情况下 GSC 控制策略对 dc-link 电压波动抑制的效果。结果表明所提出的 GSC 控制策略能有效抑制 dc-link 电压的波动幅值及振荡。
关键词: 双馈风力发电机组; 网侧变流器; dc-link 电压; 跟踪-微分器; 前馈补偿

Direct capacitance current control strategy of dc-link voltage for doubly-fed wind power generation

GAO Shihong, CUI Jiami, HU Tangchao

(School of Information Engineering, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China)

Abstract: In the conventional double closed loop control of GSC, there exists the following problems: the outer voltage loop has a slow response to the suppression of dc-link voltage fluctuation, and the inner current loop has a delay to the feed-forward compensation. So, a single closed loop control strategy of GSC is proposed, which directly controls the capacitance current of dc-link capacitor. The feed-forward compensation item introduced in the control strategy is directly applied to the control voltage node of GSC, which eliminates the delay of inner current loop to disturbance feed-forward compensation. Meanwhile, using a "tracking-differentiator" technique is to implement the feed-forward compensation of external disturbance dynamic. In the Matlab/Simulink simulation platform, the research model of GSC control strategy is constructed, and the effect of GSC control strategy on the suppression of dc-link voltage fluctuation in two typical cases is investigated. The results show that the GSC control strategy proposed in this paper can effectively suppress the fluctuation amplitude and oscillation of dc-link voltage.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2011CDC016).

Key words: doubly-fed wind turbine generation; grid-side converter; dc-link voltage; tracking-differentiator; feed-forward compensation

0 引言

目前, 风电系统中常采用 3 种主要机型作为发电设备, 如笼型异步发电机、双馈式电机及同步发电机(包括永磁同步发电机和电励磁同步发电机), 其中双馈式感应发电机(Double-Fed Induction Generator, DFIG)为流机型^[1-4]。因其特殊的变流器配置(在转子电路中配备部分功率的背靠背变流器)和并入电网的方式(定子绕组直接与电网相联接), 致使其对外界的扰动非常敏感, 例如电网故障导致的电压突然跌落。电网电压突然跌落将引起 DFIG 转子绕组

过电流以及 dc-link 电容的过电压^[5-8]。若不采取相应的保护控制措施, 振荡的转子过电流流过转子侧变流器(Rotor-Side Converter, RSC)时有可能引起其热损坏, 同时引起的过高 dc-link 直流电压将击穿电容器。为了改善 DFIG 的故障穿越性能, 一般均配备了转子侧 Crowbar(其作用是旁路转子绕组的过电流)和 dc-link 桥直流 Crowbar(其作用是泄放 dc-link 桥过剩的能量)。但为进一步提高 DFIG 的故障穿越能力, 针对 DFIG 转子侧变流器的控制, 不少学者做了大量的研究, 几种改进的 RSC 控制策略被提出^[9-16], 例如基于定子磁链消磁法的控制, 其思想是抵消定子磁链中的瞬态分量来控制 DFIG 的转子电流^[10]。但文献[9-16]所介绍的控制策略没有提及

对网侧变流器(Grid-Side Converter, GSC)的协调控制,在一定程度上限制了DFIG的故障穿越能力。因此,本文的研究重点是改进GSC的控制策略,考察其对dc-link电压波动的快速抑制能力。

经典的网侧变流器控制方法一般采用基于电网电压定向的双闭环矢量控制,外环为dc-link电压控制环,内环为DFIG转子电流控制环^[17],其控制原理是通过调节内环的转子电流来达到控制dc-link电压的目的。在这种控制策略中存在以下不足:①电压控制的外环响应速度慢;②电流控制的内环对外界扰动的反馈补偿延时。在外界扰动下,为快速抑制dc-link电压的波动,针对上述不足提出一种基于dc-link电容电流直接控制的GSC单闭环控制策略。其基本思想是直接控制dc-link电容电流,同时把外界扰动的动态进行无延时前馈补偿,达到快速抑制dc-link电压波动使其维持相对稳定。

1 GSC及DFIG的数学模型

在DFIG的转子电路中常配备一个部分功率的背靠背变流器结构,其典型电路拓扑如图1所示。其中网侧变流器GSC主要用于维持dc-link电容电压的相对稳定,保证DFIG转子回路中的功率能正常双向流动。

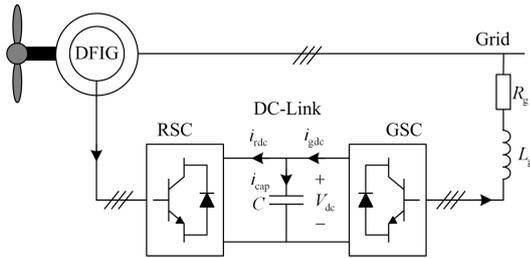


图1 典型的DFIG电路拓扑结构

Fig. 1 Typical DFIG circuit topology

1.1 GSC的数学模型

为方便实施GSC的控制策略,选择以电网角频率旋转的 $d-q$ 参考坐标系建立GSC的数学模型。以dc-link电容电压 V_{dc} 和网侧变流器GSC交流侧的线电流 i_{gd} 及 i_{gq} 为状态变量,可得网侧变流器GSC与dc-link电容器的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_{gd}}{dt} = -\frac{R_g}{L_g}i_{gd} + \omega_1 i_{gq} + \frac{1}{L_g}e_{gd} - \frac{1}{L_g}v_{gd} \\ \frac{di_{gq}}{dt} = -\frac{R_g}{L_g}i_{gq} - \omega_1 i_{gd} + \frac{1}{L_g}e_{gq} - \frac{1}{L_g}v_{gq} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}i_{cap} \end{cases} \quad (1)$$

其中: ω_1 为电网角频率; v_{gd} 、 v_{gq} 为GSC交流侧的 $d-q$ 轴电压; i_{gd} 、 i_{gq} 为GSC交流侧的 $d-q$ 轴电流; R_g 、 L_g 为网侧滤波电感器的电阻和电感; e_{gd} 、 e_{gq} 为电网的 $d-q$ 轴电压; V_{dc} 、 i_{cap} 、 C 为dc-link电容器的电压、电流及电容。

若网侧变流器GSC采用电网电压矢量定向控制且不向电网增发无功,则 $e_{gq} = 0$, $i_{gq} = 0$ 。不计网侧变流器GSC的开关损耗,结合式(1)可得网侧变流器GSC向dc-link提供的功率 P_{gdc} 为

$$P_{gdc} = V_{dc}i_{gdc} = \frac{3}{2}(v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq}) = \frac{3}{2}e_{gd}i_{gd} \quad (2)$$

其中, i_{gdc} 为网侧变流器直流侧的电流。

另外,注入dc-link电容器的功率 P_{dc} 可表示为

$$P_{dc} = V_{dc}i_{cap} = V_{dc}C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3)$$

1.2 DFIG的数学模型

同样地,在以电网角频率旋转的 $d-q$ 参考坐标系下,选择DFIG的转子电流 i_{rd} 及 i_{rq} 为状态变量。若转子侧变流器RSC采用定子磁链矢量定向控制,即 $\psi_{sq} = 0$,则可得DFIG转子绕组的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{R_r}{\sigma L_r}i_{rd} + \omega_{sl}i_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r}v_{rd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -\frac{R_r}{\sigma L_r}i_{rq} - \omega_{sl}i_{rd} - \omega_{sl}\frac{k_s}{\sigma L_r}\psi_{sd} + \frac{1}{\sigma L_r}v_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

其中: ω_{sl} 为转差频率, $\omega_{sl} = \omega_1 - \omega_r$,其中 ω_r 为DFIG转子角频率; v_{rd} 、 v_{rq} 为DFIG转子绕组的 $d-q$ 轴电压; i_{rd} 、 i_{rq} 为DFIG转子绕组的 $d-q$ 轴电流; R_r 、 L_r 为DFIG转子绕组的电阻和电感; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 为DFIG定子绕组的 $d-q$ 轴磁链; $k_s = L_m / L_s$ 为定子耦合系数; $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ 为漏磁系数。

若忽略DFIG转子侧变流器RSC的开关损耗,则dc-link向DFIG转子绕组提供的功率 P_{rdc} 为

$$P_{rdc} = V_{dc}i_{rdc} = \frac{3}{2}(v_{rd}i_{rd} + v_{rq}i_{rq}) \quad (5)$$

其中, i_{rdc} 为DFIG转子侧变流器直流侧的电流。

2 GSC的控制策略

2.1 传统及电流前馈的GSC控制策略

网侧变流器GSC传统的控制策略常采用基于电网电压定向的双闭环矢量控制,其控制原理是通过调节网侧变流器GSC交流侧的 d 轴电流 i_{gd} 来控制dc-link的电容电压,其 d 轴控制原理框图如图2所示。

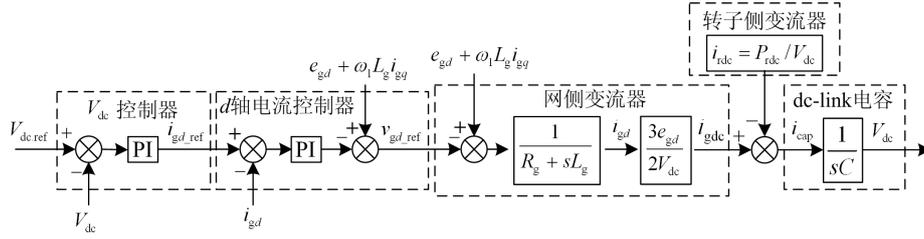


图 2 传统的 GSC 控制框图

Fig. 2 Traditional GSC control block diagram

由图 2 可看出，GSC 传统控制器在设计时只考虑了电网电压的外部扰动和 GSC 的内部扰动(即交叉耦合项)的前馈补偿，没有实施反映 DFIG 转子绕组功率扰动的前馈补偿。为了进一步改善 GSC 控制策略的抗扰性能，文献[18]在 GSC 传统控制策略的基础上引入了一个反映 DFIG 转子绕组功率扰动的电流前馈补偿，其 d 轴控制原理框图如图 3 所示。

由图 3 可看出，文献[18]虽对 DFIG 转子绕组

功率的扰动进行了前馈补偿，并把此前馈补偿项施加在 d 轴的电流节点上，作为 d 轴参考电流的一个分量。对扰动前馈补偿项来说，从扰动前馈补偿节点到扰动节点的前向通道中存在一个 PI 电流调节器以及一个动态延时环节 $1/(R_g + sL_g)$ 。因此，这个前馈补偿项不能完全补偿反映 DFIG 转子绕组功率引起的扰动，并且扰动补偿存在一定的延时。

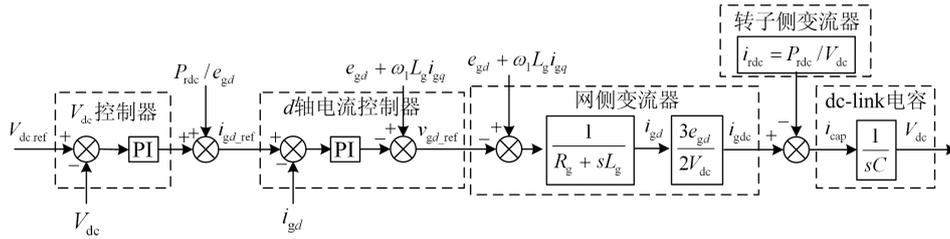


图 3 电流前馈的 GSC 控制框图

Fig. 3 Current feed-forward GSC control block diagram

2.2 提出的 GSC 控制策略

针对上述 GSC 控制策略的不足，为快速抑制 dc-link 电容电压的波动，本文提出一个单闭环的快速且无延时完全补偿 DFIG 转子绕组功率扰动的 GSC 控制策略，即直接以 dc-link 电容器的电流为控制变量，如果控制 dc-link 电容器的电流为零 ($i_{cap_ref} = 0$)，就可以保证 dc-link 电容电压 V_{dc} 保持相对稳定。再者，本文提出的 GSC 控制策略只有一个 dc-link 电容电流控制环，并可完全补偿 DFIG 转子绕组功率扰动对 dc-link 电容电压的影响。下面将详细介绍这种控制策略的控制原理。

由图 1 可知，对 dc-link 电容器节点应满足如下功率平衡方程：

$$P_{dc} = P_{gdc} - P_{rdc} \quad (6)$$

把式(2)和式(3)代入式(6)，dc-link 电容器节点的功率平衡方程可重写为

$$V_{dc} C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} C \frac{dV_{dc}^2}{dt} = \frac{3}{2} e_{gd} i_{gd} - P_{rdc} \quad (7)$$

把式(7)中的 V_{dc}^2 在参考电容电压 V_{dc_ref} 处进行一阶泰勒展开可得

$$V_{dc}^2 = V_{dc_ref}^2 + 2V_{dc_ref}(V_{dc} - V_{dc_ref}) = 2V_{dc_ref}V_{dc} - V_{dc_ref}^2 \quad (8)$$

式(8)代入式(7)，可得网侧变流器 GSC 交流侧的 d 轴电流 i_{gd} 为

$$i_{gd} = \frac{2V_{dc_ref}}{3e_{gd}} i_{cap} + \frac{2}{3e_{gd}} P_{rdc} \quad (9)$$

式(9)代入式(1)，可推导出网侧变流器交流侧的 d 轴电压 v_{gd} 为

$$v_{gd} = -\frac{2V_{dc_ref}}{3e_{gd}} (R_g i_{cap} + L_g \frac{di_{cap}}{dt}) + \omega_1 L_g i_{gq} + e_{gd} - \frac{2}{3e_{gd}} (R_g P_{rdc} + L_g \frac{dP_{rdc}}{dt}) \quad (10)$$

由式(10)可知，若直接以 dc-link 电容器的电流为控制变量，采用 PI 电流调节器，则可得网侧变流器 d 轴的控制策略为

$$v_{gd_ref} = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_{cap_ref} - i_{cap}) + \omega_1 L_g i_{gq} + e_{gd} - \frac{2}{3e_{gd}}(R_g + sL_g)P_{rdc} \quad (11)$$

根据式(11)可得直接电容电流控制的网侧变流器 d 轴的控制原理框图如图 4 所示。

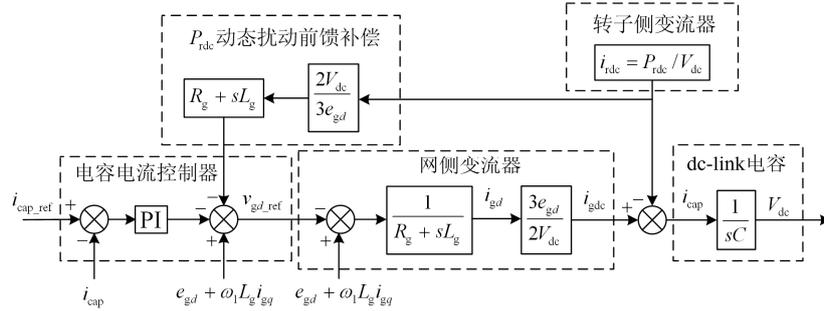


图 4 GSC 的 d 轴控制框图

Fig. 4 d axis control block diagram of GSC

网侧变流器 q 轴的控制同传统策略一样, 这里不再详细介绍, 在此仅给出其控制原理框图如图 5 所示。

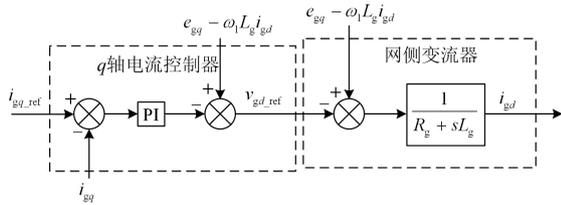


图 5 GSC 的 q 轴控制框图

Fig. 5 q axis control block diagram of GSC

由图 4 可看出, 在本文提出的控制策略中通过直接控制 dc-link 电容器的电流, 来达到控制 dc-link 电容电压的目的, 而非上述两种控制策略通过调节 GSC 的 d 轴电流 i_{gd} 来控制 dc-link 的电容电压。而且, 反映 DFIG 转子绕组功率扰动的前馈补偿是以电压的形式施加在 d 轴的电压节点上, 而非如上述电流前馈的控制策略中以电流的形式施加在 d 轴的电流节点上。另外, 从图 4 还可看出, 在 DFIG 转子绕组功率扰动前馈补偿的前向通道中不存在 PI 调节器, 避免了 PI 调节器对前馈补偿的延时, 前馈补偿项可完全补偿 DFIG 转子绕组功率的扰动。

然而, 在所提出的 GSC 控制策略中, 从图 4 可看出 DFIG 转子绕组功率扰动前馈补偿时包含一个比例-微分环节 $R_g + sL_g$ 。为避免经典微分环节的“噪声放大”效应, 本文在实施这个环节时引入了一个“跟踪-微分器”^[19], 其主要作用是尽快跟踪 DFIG 转子绕组的功率 P_{rdc} 并给出其微分信号。由文献[19]的介绍可知, “跟踪-微分器”具有如下功能: 给它一个输入信号 $u(t)$, 可得到两个输出信号 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$, 信号 $z_1(t)$ 跟踪输入信号 $u(t)$, 而信号 $z_2(t)$

为输入信号 $u(t)$ 的近似微分, 即 $z_2(t) = \dot{z}_1(t)$ 。根据文献[20]提供的方法可构造出如下形式的线性二阶跟踪-微分器, 其数字实现方式为

$$\begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + T_s z_2(k) \\ z_2(k+1) = (1 - 2\gamma T_s) z_2(k) - \gamma^2 T_s [z_1(k) - u(k)] \end{cases} \quad (12)$$

其中: γ 为反映跟踪速度和精度的调节参数; T_s 为采样周期。

下面通过一个简单的例子来说明上述构建的“跟踪-微分器”所具有的功能, 设“跟踪-微分器”的输入为一个正弦信号 $u(t) = \sin(2\pi t)$, 调节参数 γ 设定为 990, 其输出的仿真波形如图 6 所示。为了更清楚地显示各仿真波形, 分别对 z_1 和 z_2 进行如下处理: $z_1' = z_1 + 0.2$, $z_2' = z_2 / 2\pi$ 。

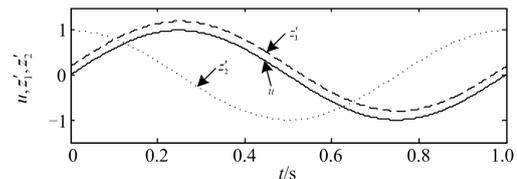


图 6 跟踪-微分器的输入输出波形

Fig. 6 Input/output waveform of tracking-differentiator

由图 6 可看出, 本文所构建的“跟踪-微分器”能很好地跟踪输入信号并给出其微分信号。

3 提出的 GSC 控制策略评估

为验证所提出的 GSC 控制策略的正确性以及其对 dc-link 电压波动抑制的效果, 本文对两类型情况进行了评估, 即电网电压正常情况下及电网电压跌落情况下, 并利用 Matlab/Simulink 平台在其中构建了控制策略评估研究的仿真模型。RSC 的控制参数为: $k_p = 0.6$, $k_i = 8$; GSC 的控制参数为: $k_p = 2$,

$k_i = 900$; 双馈式风力发电机的主要参数如表 1 所示。

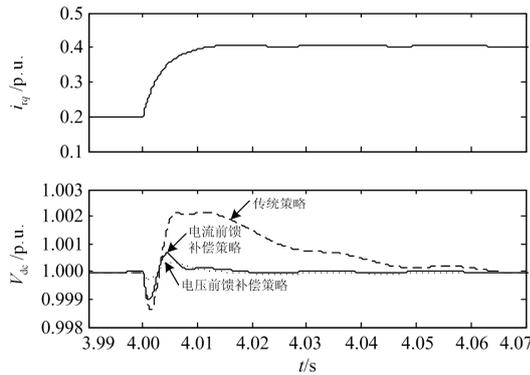
表 1 DFIG 的主要参数

Table 1 Main parameters of DFIG

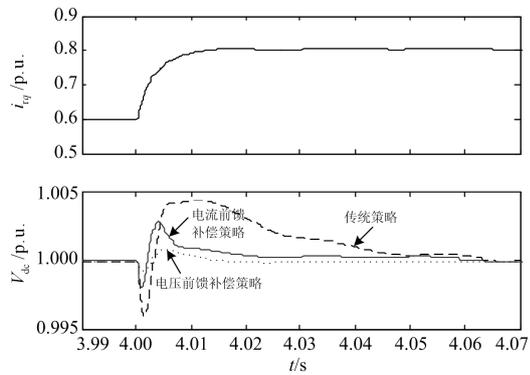
参数	功率	定子电压	定、转子匝比	频率	定子电阻
数值	2 MW	690 V	0.63	50 Hz	0.005 p.u.
参数	定子漏电感	转子电阻	转子漏电感	激磁电感	极对数
数值	0.105 p.u.	0.005 5 p.u.	0.1 p.u.	3.953 p.u.	2

3.1 电网电压正常情况下的评估

在电网电压正常情况下，双馈式感应发电机以单位功率因数运行，控制 DFIG 有功功率的转子 q 轴电流 i_{tq} 在 $t = 4$ s 时遭受一个阶跃变化。本文对 DFIG 两种典型的运行状态进行评估：一种是 DFIG 工作于次同步时 i_{tq} 从 0.2 p.u. 跃变到 0.4 p.u.；另一种是 DFIG 工作于超同步时 i_{tq} 从 0.6 p.u. 跃变到 0.8 p.u.。其他运行条件保持不变。为评估本文所提出的 GSC 控制策略在电网电压正常情况下对 dc-link 电压波动抑制的效果，并与传统和改进的 GSC 控制策略进行了对比研究。DFIG 转子绕组 q 轴电流 i_{tq} 及 dc-link 电容电压 V_{dc} 的动态波形如图 7 所示。



(a) 次同步状态



(b) 超同步状态

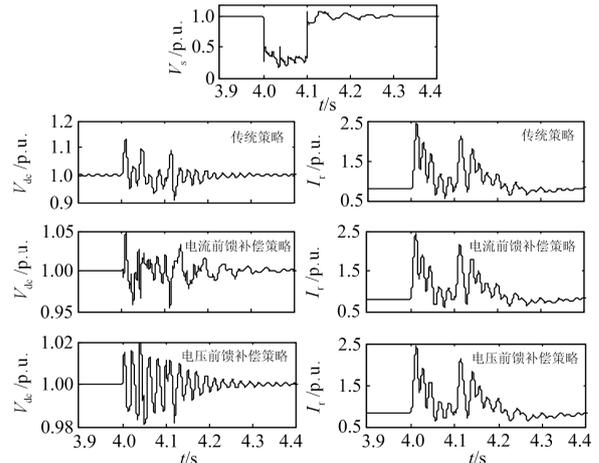
图 7 阶跃响应下 v_{dc} 的动态行为

Fig. 7 Dynamic behaviors of v_{dc} under step response

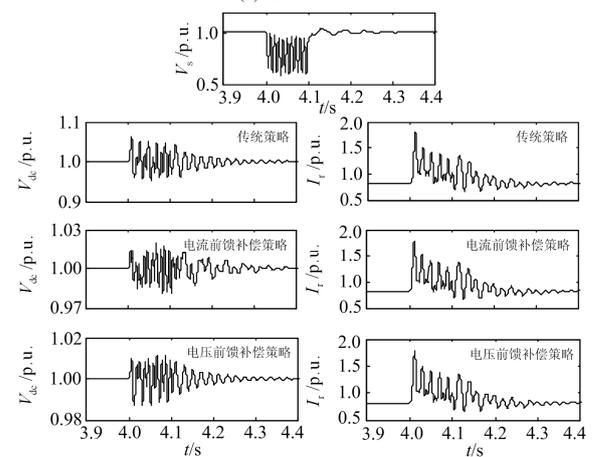
由图 7 可看出，在电网电压正常情况下，DFIG 有功功率的阶跃变化将导致 dc-link 电容电压 V_{dc} 在 $t = 4$ s 时刻发生轻微波动且很快衰减到稳定，对比 3 种 GSC 控制策略，本文所提出的控制策略具有较好的抑制效果：电容电压的波动幅值小且衰减快。3 种控制策略对 dc-link 电压幅值的抑制情况如表 2 所示。

3.2 电网电压跌落情况下的评估

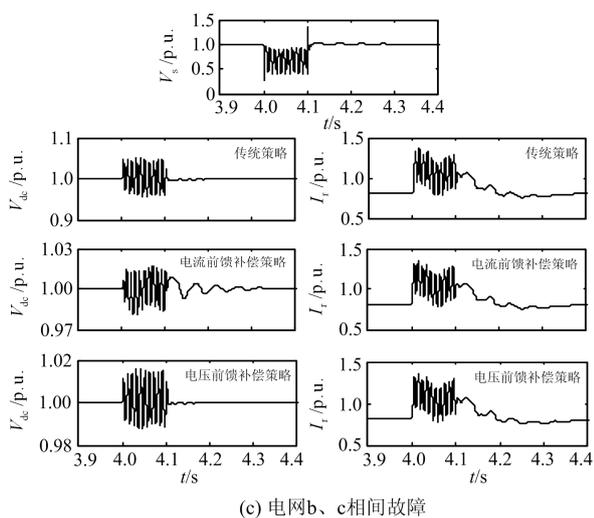
电网故障导致电压跌落的类型有对称跌落和不对称跌落两种类型，本文在此对电网 3 种典型故障导致 DFIG 并网点电压跌落 0.7 p.u. 情况进行评估，即电网三相对称故障、单相(a 相)接地故障及相间(b、c 相)故障。电网故障导致并网点电压跌落前 DFIG 稳定运行在转差 $s = -0.2$ 的超同步发电状态且功率因数为 $\cos \varphi = 0.9$ 。在 $t = 4$ s 时电网发生故障导致 DFIG 并网点电压跌落，持续时间为 0.1 s。另外，为了评估本文提出的 GSC 控制策略在电网故障期间对 dc-link 电容电压波动的抑制效果，没有考虑 DFIG 转子侧和直流侧 Crowbar 的作用。DFIG 机端电压 V_s 及 dc-link 电容电压 V_{dc} 的动态波形如图 8 所示。



(a) 电网三相对称故障



(b) 电网 a 相接地故障

图 8 电压跌落期间 v_{dc} 的动态行为Fig. 8 Dynamic behaviors of v_{dc} during voltage dip

由图 8 可看出, 在电网故障引起 DFIG 并网电压跌落期间, 将引起 dc-link 电容电压发生剧烈振荡(特别是电网不对称故障期间)并产生较大的冲击幅值, 通过对 3 种网侧变流器 GSC 控制策略的对比分析, 本文所提出的 GSC 控制策略对 dc-link 电容电压波动幅值和振荡具有优良的抑制性能, 各类电网典型故障导致的 dc-link 电容电压的冲击幅值远低于安全限值(一般设定为 1.1 倍的额定电容电压, 即 1.1 p.u.)。同时, 在转子侧变流器控制策略不变的情况下, 基本不影响转子电流在电压跌落期间的动态性能。3 种控制策略的详细对比情况如表 2 所示。

表 2 结果对比

Table 2 Comparison of results

控制策略		传统		电流前馈补偿		电压前馈补偿	
		$V_{dcmax}/$ p.u.	$I_{rmax}/$ p.u.	$V_{dcmax}/$ p.u.	$I_{rmax}/$ p.u.	$V_{dcmax}/$ p.u.	$I_{rmax}/$ p.u.
正常	次同步	1.002 1	0.456 9	1.000 7	0.456 9	1.000 3	0.457 1
	超同步	1.004 4	0.833 2	1.002 7	0.833 3	1.000 7	0.833 5
故障类型	对称故障	1.131 2	2.445 6	1.058	2.428 4	1.022 4	2.425 3
	单相接地	1.061 9	1.800 2	1.020 1	1.793 1	1.011 2	1.791 7
	相间故障	1.052 5	1.364 3	1.016 4	1.343 5	1.016 1	1.356 8

4 结论

为快速抑制在外界扰动下双馈风力发电系统 dc-link 电容电压的波动, 本文提出了一个直接电容电流控制的 GSC 控制策略, 并且对转子绕组功率扰动进行了无延时前馈补偿。详细阐述了这种控制策略的控制原理并进行了仿真实验研究。为验证所提出的 GSC 控制策略对 dc-link 电压波动抑制的效果, 对电网电压正常情况下 DFIG 有功功率阶跃变化的扰动和电网电压三相不对称跌落引起的扰动进行了仿

真研究评估。通过图 7、图 8 及表 2 的对比分析可知, 本文所提出的 GSC 控制策略具有快速的瞬态响应速度及较强的振荡阻尼, 有效地抑制了 dc-link 电容电压的幅值和振荡, 协同 RSC 的控制有助于 DFIG 故障穿越能力的提高。

参考文献

- [1] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
HE Yikang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [2] 王磊, 张琛, 李征, 等. 风双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90.
WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.
- [3] 盛万兴, 马静, 张瑜, 等. 基于故障等值网络的双馈风电机组三相短路电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 7-14.
SHENG Wanxing, MA Jing, ZHANG Yu, et al. Research on calculation method of three-phase short circuit current for doubly-fed wind power generator based on the fault equivalent network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 7-14.
- [4] MORREN J, DE HAAN S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(1): 435-441.
- [5] 张俊峰, 高亮, 沈奕菲, 等. 适用于双馈机组风电场的故障电压序分量选相元件[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 136-143.
ZHANG Junfeng, GAO Liang, SHEN Yifei, et al. Fault-sequence element of voltage phase selection applied to DFIG-based wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 136-143.
- [6] 张学广, 徐殿国, 李伟伟. 电网对称故障下基于 active crowbar 双馈发电机控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 99-103.
ZHANG Xueguang, XU Dianguo, LI Weiwei. Research on control of DFIG with active crowbar under symmetry voltage fault condition[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 99-103.

[7] 徐海亮, 章玮, 贺益康, 等. 双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 8-15.
XU Hailiang, ZHANG Wei, HE Yikang, et al. A review on low voltage ride-through technologies and prospect for DFIG wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 8-15.

[8] 高仕红, 张昌华, 耿东山, 等. 提高双馈式风力发电机故障穿越能力的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 126-132.
GAO Shihong, ZHANG Changhua, GENG Dongshan, et al. Control strategy of fault ride-through capability enhancement for doubly-fed wind generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 126-132.

[9] 张艳霞, 童锐, 赵杰, 等. 双馈风电机组暂态特性分析及低电压穿越方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 7-11, 62.
ZHANG Yanxia, TONG Rui, ZHAO Jie, et al. Transient characteristics analysis and low voltage ride-through scheme of doubly-fed wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 7-11, 62.

[10] XIANG D, RAN L, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.

[11] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.

[12] FLANNERY P S, VENKATARAMANAN G. A fault tolerant doubly fed induction generator wind turbine using a parallel grid side rectifier and series grid side converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1126-1135.

[13] IBRAHIM A O, NGUYEN T H, LEE D C, et al. A fault ride-through technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 871-881.

[14] CAUSEBROOK A, ATKINSON D J, JACK A G. Fault ride-through of large wind farms using series dynamic braking resistors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 966-975.

[15] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
HU Jiabing, SUN Dan, HE Yikang, et al. Modeling and control of DFIG wind energy generation system under grid voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 21-26.

[16] 王永强, 喻俊志, 冯静安, 等. 永磁直驱风电机组低/高电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 34-41.
WANG Yongqiang, YU Junzhi, FENG Jingan, et al. Research on low/high voltage ride through of permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 34-41.

[17] HUR N, JUNG J, NAM K. A fast dynamic dc-link power-balancing scheme for a PWM converter-inverter system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(4): 794-803.

[18] YAO J, LI H, LIAO Y, et al. An improved control strategy of limiting the DC-link voltage fluctuation for a doubly fed induction wind generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1205-1213.

[19] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
HAN Jingqing, WANG Wei. Nonlinear tracking-differentiator[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1994, 14(2): 177-183.

[20] GUO B, HAN J, XI F. Linear tracking-differentiator and application to online estimation of the frequency of a sinusoidal signal with random noise perturbation[J]. International Journal of Systems Science, 2002, 33(5): 351-358.

收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-07-12

作者简介:

高仕红(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大功率电力电子在电力系统中的应用、风力发电系统的运行与控制; E-mail: gaosh0708@163.com

崔佳咪(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电的控制技术; E-mail: 983680698@qq.com

胡唐超(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电的继电保护技术。E-mail: 417949515@qq.com

(编辑 葛艳娜)