

提高DFIG低电压穿越性能的转子Crowbar自适应切除控制方法

姜惠兰,周陶,贾燕琪,陈娟,张弛,周照清,薛静玮

(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:针对Crowbar传统控制策略的不足,推导了双馈风力发电机(DFIG)在系统发生三相短路且转子Crowbar电路切除后的转子电流表达式,并提出了一种转子Crowbar自适应切除控制策略。假设当前时刻切除Crowbar,实时计算将出现的转子电流最大值,并在该最大值小于Crowbar动作阈值时将Crowbar切除,保证以Crowbar不会反复投切为前提尽早切除Crowbar,达到从系统少吸收无功和延长Crowbar开关器件使用寿命的目的。通过MATLAB/Simulink仿真验证了所提控制方法的有效性。

关键词:双馈风力发电机;低电压穿越;Crowbar;自适应控制;风电

中图分类号:TM 614

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.014

0 引言

电力电子设备随着其技术的不断发展,在电力系统中得到了越来越多的应用^[1]。其中,电力电子变换技术的进步使以风能为代表的清洁能源得以实现利用。双馈风力发电机DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)作为主流机型被广泛应用于大型风电场中,风电渗透率的不断提高改变了电力电子化电力系统的运行特性。

DFIG的暂态特性十分复杂,由于其定子直接与电网相连,在系统发生故障时定子磁链无法突变,将在转子绕组上感应出极大的电流,并有可能损坏风机和变流器,或造成风机脱网。因此,风电机组必须拥有满足电网运营商所要求的低电压穿越LVRT(Low Voltage Ride-Through)能力^[2-4]。

目前,大多数的DFIG采用转子侧并联Crowbar保护电路在电网故障期间加快故障电流和定子暂态磁链的衰减,以提高风机的LVRT能力。文献[5-9]从DFIG的数学模型出发,根据Crowbar投入后的短路特性推导了转子电流的暂态表达式。文献[10-12]讨论了Crowbar的不同阻值以及切除时刻对系统产生的影响,其中文献[12]指出Crowbar电阻对风机LVRT性能的影响很大,且由于Crowbar电路投入期间DFIG将近似于异步电动机工作,从电网吸收大量的无功功率,进一步拉低故障点电压,因此Crowbar在切除故障之前被切除能减少DFIG从系统吸收无功,达到更好的LVRT效果。然而过早地切除Crowbar也可能导致转子电流暂态扰动过大并再次投入Crowbar。文献[13-14]给出了Crowbar阻值

优化方案,但对Crowbar切除时间并没有深入研究,仍采用Crowbar传统控制策略。

Crowbar传统控制策略在系统故障造成不同电压跌落深度下均使用固定的电流阈值及延时来对Crowbar进行切除,这将带来两方面的问题:当故障较为严重时Crowbar将会多次反复投切,增加了DFIG所吸收的系统无功,不利于系统电压恢复,同时会降低电力电子开关器件的使用寿命,并给DFIG带来电磁转矩冲击^[15],对风机安全造成危害;当故障较轻时,Crowbar的延时切除使得Crowbar的投入时间过长,增大了Crowbar投入期间DFIG所需吸收的系统无功功率,不利于DFIG的LVRT性能。

针对目前Crowbar切除控制策略的不足,本文提出了一种Crowbar自适应切除控制策略,对Crowbar切除后DFIG转子电流暂态变化过程进行了理论推导分析,通过实时计算假设在当前时刻切除Crowbar电路将产生的转子电流最大值来实现对Crowbar切除时刻的有效控制,以保证在Crowbar不会再投入的前提下尽早切除Crowbar,最大限度地降低Crowbar反复投入所带来的不利影响。

1 DFIG的数学模型

在电动机惯例下且变量均折算至定子侧后,DFIG在转子转速参考坐标系下的电压和磁链方程可以表示为:

$$\begin{cases} u_s^r = R_s i_s^r + \frac{d}{dt} \psi_s^r + j\omega_r \psi_s^r \\ u_r^r = R_r i_r^r + \frac{d}{dt} \psi_r^r \\ \psi_s^r = L_s i_s^r + L_m i_r^r \\ \psi_r^r = L_m i_s^r + L_r i_r^r \end{cases} \quad (1)$$

其中,上标r表示转子坐标系下的变量; u_s 、 u_r 分别

收稿日期:2017-11-30;修回日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477115)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477115)

为定、转子电压; ψ_s 、 ψ_r 分别为定、转子磁链; i_s 、 i_r 分别为定、转子电流; R_s 、 R_r 分别为定、转子绕组电阻; L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定、转子绕组等效电感及定、转子绕组间的互感; ω_r 为转子转速。

2 故障时 DFIG 转子电流骤升机理

假设系统在 t_0 时刻之前稳定运行, t_0 时刻系统发生三相短路故障, 并导致 DFIG 定子电压跌落且跌落深度为 $1-h$, 此时定子电压可表示为:

$$u_s^r = \begin{cases} U_{s0} e^{j\omega_{slip} t} & t < t_0 \\ h U_{s0} e^{j\omega_{slip} t} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, U_{s0} 为故障发生前的定子电压; $\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r$ 为转差转速, ω_s 为同步转速。

假设 $t_0 = 0$, 将式(2)代入式(1)可得电压跌落后的定子磁链表达式^[16-17]:

$$\psi_s^r = \frac{h \left(U_{s0} + \frac{L_m R_s}{L_s} i_r^r \right)}{j\omega_s} e^{j\omega_{slip} t} + \frac{(1-h) \left(U_{s0} + \frac{L_m R_s}{L_s} i_r^r \right)}{j\omega_s} e^{-\left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r\right)t} \quad (3)$$

其中, $\tau_s = L_s / R_s$ 为定子时间常数。

由于 DFIG 的定子电阻 R_s 很小, 忽略 $L_m R_s i_r^r / L_s$ 项后, 有 $U_{s0} + L_m R_s i_r^r / L_s \approx U_{s0}$, 则式(3)可以写成:

$$\psi_s^r = \frac{h U_{s0}}{j\omega_s} e^{j\omega_{slip} t} + \frac{(1-h) U_{s0}}{j\omega_s} e^{-\left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r\right)t} \quad (4)$$

消去式(1)中的转子磁链和定子电流, 整理可得转子电压与转子电流、定子磁链的关系式为:

$$u_r^r = R_r i_r^r + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_r^r + E^r \quad (5)$$

其中, $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$; $E^r = \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \psi_s^r$ 为定子磁链在转子绕组中所产生的感应电动势; u_r^r 为转子侧变流器 RSC (Rotor Side Converter) 提供的转子励磁电压。

根据式(5)可以得到 DFIG 等效电路图, 如图 1 所示。

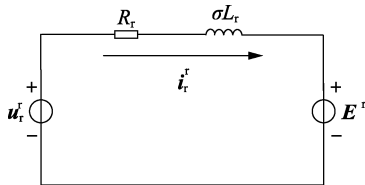


图 1 DFIG 等效电路图

Fig.1 Equivalent model of DFIG

将式(4)代入 E^r 中, 可得故障发生后 DFIG 在转

子转速坐标系下定子磁链在转子侧所产生的感应电动势为:

$$E^r = \frac{L_m}{L_s} s h U_{s0} e^{j\omega_{slip} t} - \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r \right) (1-h) \frac{U_{s0}}{j\omega_s} e^{-\left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r\right)t} \quad (6)$$

其中, $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ 为转差率。

若忽略较小的 $1/\tau_s$ 项, 则感应电动势 E^r 可表示为^[17]:

$$E^r = \frac{L_m}{L_s} s h U_{s0} e^{j\omega_{slip} t} - \frac{L_m}{L_s} (1-s) (1-h) U_{s0} e^{-\left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r\right)t} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 由于定、转子磁场耦合, 故障发生后定子磁链在转子绕组上所产生的感应电动势分为 2 个部分: 第一项是在转子转速坐标系中以转差转速旋转的交流分量, 其幅值分别与转差率和跌落后的定子电压成正比; 第二项则是按照 τ_s 衰减的直流分量, 在转子转速坐标系中以转子转速反向旋转。

然而从式(5)可知, 转子电流大小取决于转子电压和感应电动势在转子电阻上产生的压降。由于 DFIG 的转差率通常在 $-0.2 \sim 0.2$ 之间, 并且当电压发生严重跌落时 h 极小, 这意味着定子磁链将在转子绕组上产生较大的感应电动势。若不能采取有效的措施, 该暂态感应电动势容易超出 RSC 的可控电压范围, 从而导致转子电流的骤升并在转子绕组上产生过电流, 损坏机组和变流器。

3 Crowbar 切除后的转子电流暂态分析

设在 t_1 时刻 Crowbar 电路投入工作, 同时闭锁 RSC, 并在 t_2 时刻切除 Crowbar 并恢复 RSC 的工作。Crowbar 切除后, 转子电压方程和 DFIG 的等效电路图仍为式(5)和图 1, 若假设在 LVRT 过程中 DFIG 的转速不发生变化^[18], 将式(7)代入式(5)中并求解式(5)的转子电流微分方程, 即可得到 Crowbar 切除后的转子电流表达式:

$$\begin{aligned} i_r^r(t) = & \frac{e^{-\frac{R_r}{\sigma L_r} t}}{\sigma L_r} \int_{t_2}^t u_r^r(\tau) e^{\frac{R_r}{\sigma L_r} \tau} d\tau + \\ & (I_r^r(t_2) + I_{r(1)}^r(t_2)) e^{-\frac{R_r}{\sigma L_r} (t-t_2)} + \\ & I_{r(2)}^r(t_2) e^{-\left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r\right)(t-t_2)} + \\ & I_{r(3)}^r(t_2) e^{j\omega_{slip}(t-t_2)} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $I_r^r(t_2)$ 为 Crowbar 切除时刻 t_2 的转子电流; $I_{r(1)}^r$ 、 $I_{r(2)}^r$ 、 $I_{r(3)}^r$ 如式(9)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} I_{r(1)}^r(t) &= \frac{L_m}{L_s} \frac{h}{\sigma L_r} \frac{s U_{s0} e^{j\omega_{slip} t}}{\frac{1}{\tau_r} + j\omega_{slip}} \\ I_{r(2)}^r(t) &= \frac{L_m}{L_s} \frac{(1-h)}{\sigma L_r} \frac{(1-s) U_{s0} e^{-\left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r\right) t}}{\frac{1}{\tau_r} - \left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r\right)} \\ I_{r(3)}^r(t) &= -\frac{L_m}{L_s} \frac{h}{\sigma L_r} \frac{s U_{s0} e^{j\omega_{slip} t}}{\frac{1}{\tau_r} + j\omega_{slip}} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

其中, $\tau_r = \sigma L_r / R_r$ 为转子时间常数。

由式(8)可以看出,此时的转子电流中存在由于Crowbar电路切除以及RSC的重新投入而产生的新的暂态量。Crowbar切除后的转子电流含有4种分量:①由RSC重新投入所提供的转子励磁电压所产生的分量;②按等效转子时间常数衰减的直流分量,由Crowbar切除时刻的电路参数以及电网的故障程度决定;③按照定子时间常数衰减的转子转速旋转分量,由电网的故障程度决定;④转差转速旋转分量,由电网的故障程度决定。通过分析可知,Crowbar切除后转子电流最大值 $|i_{r-cu}^r|_{\max}$ 一般出现在Crowbar切除后的 $T/2$ 时刻^[11],即由式(8)可得:

$$|i_{r-cu}^r|_{\max} = |i_r^r(t_2 + T/2)| \quad (10)$$

4 Crowbar 自适应切除控制策略

Crowbar的投入时长由电网的故障程度及Crowbar的控制策略共同影响;电网故障越严重则Crowbar的投入时间越长;然而相同故障下Crowbar投入时间的长短主要取决于Crowbar的控制策略。因此调整Crowbar所采取的策略是控制其投入时长的有效手段。

Crowbar的传统控制策略是按照设定的固定阈值来执行^[19],即当转子电流幅值 $|i_r|$ 超过Crowbar动作值 I_{r-th} 时投入Crowbar,小于返回值 I_{r-re} 时则经过一段延时后切除Crowbar。由式(8)可知,如果采用Crowbar传统控制策略,当电网故障程度较严重时,如果Crowbar的切除延时时间设置得不合理,Crowbar切除仍可能引起过大的转子暂态电流并超过 I_{r-th} ,从而造成Crowbar的再次投入;当电压跌落程度较轻时,Crowbar需等到转子电流小于 I_{r-re} 并延时一段时间之后才能被切除,导致Crowbar投入的时间远长于其真正所需的时间。所以Crowbar的传统控制策略存在一定不足,诸如降低DFIG的LVRT

性能、影响电力电子开关器件的使用寿命、产生DFIG电磁转矩振荡而影响风电机组的安全、增加DFIG从系统吸收的无功功率等。因此,有必要从理论上探求合理的Crowbar切除时间点的有效控制方法。

本文提出了一种Crowbar的自适应切除控制策略,为了在避免Crowbar反复投切的前提下尽早安全切除Crowbar,该策略并不是以转子电流小于固定的Crowbar返回值作为切除Crowbar的判据,而是以按照式(10)所实时计算出的假设当前时刻切除Crowbar将产生的转子电流最大值不会超过Crowbar的动作值 I_{r-th} 作为判据的,从而实现对Crowbar切除时刻的有效控制。则当电网发生较为严重的故障时,能够保证Crowbar切除后转子电流不再越限,进而避免其再次投入;电网故障程度较轻时,则能够在保证转子电流不会再对DFIG以及变流器造成威胁的前提下尽早切除Crowbar,从而缩短Crowbar的投入时间。

在实际计算分析中,考虑到 $u_r^r(t)$ 在假设Crowbar切除时刻之后无法获得,且暂态期间风机转子电流冲击变化主要受感应电动势 E^r 影响, $u_r^r(t)$ 采用假设Crowbar切除时刻的 $u_r^r(t_2)$ 值所造成的转子电流计算和实际值之间的误差并不大,因此本文将切除时刻之后的 $u_r^r(t)$ 取为 $u_r^r(t_2)$,式(8)相应化为:

$$i_r^r(t) = \frac{u_r^r(t_2)}{R_r} + \left(-\frac{u_r^r(t_2)}{R_r} + I_{r(2)}^r(t_2) + I_{r(1)}^r(t_2) \right) e^{-\frac{R_r}{\sigma L_r}(t-t_2)} + I_{r(2)}^r(t_2) e^{-\left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r\right)(t-t_2)} + I_{r(3)}^r(t_2) e^{j\omega_{slip}(t-t_2)} \quad (11)$$

故障期间Crowbar的控制流程如图2所示。

5 仿真分析

为验证本文所推导的Crowbar切除后转子电流表达式的正确性以及所提出的Crowbar自适应切除控制策略的有效性,下文进行了仿真分析。

在MATLAB/Simulink中搭建如图3所示的1.5 MW DFIG-无穷大系统模型,DFIG参数如下:额定功率为1.5 MW,额定电压为0.575 kV,定子电阻为0.023 p.u.,转子电阻为0.016 p.u.,定子漏感为0.18 p.u.,转子漏感为0.16 p.u.,互感为2.9 p.u.,初始转差率为-0.2,电容电压为1 150 V,匝间比为0.3。30 km线路参数为:正序、零序电阻分别为0.115 3 Ω/km 、0.413 Ω/km ;正序、零序电感分别为 $1.05 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ 、 $3.32 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$;正序、零序电容分别为 $1.133 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km}$ 、 $5.01 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$ 。

假设在0.05 s时系统发生三相短路故障,导致定子电压跌落深度分别为60%和80%,在0.25 s切除故障,故障持续200 ms,Crowbar电阻取0.1 Ω 。Crowbar电路的传统控制策略中,转子电流超过

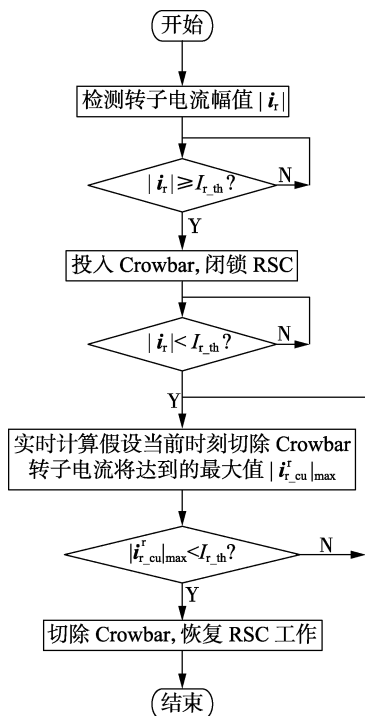


图 2 Crowbar 自适应控制策略

Fig.2 Adaptive control strategy of Crowbar

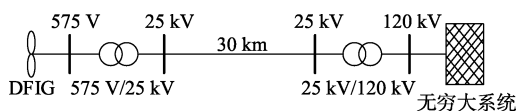


图 3 DFIG-无穷大系统模型

Fig.3 Model of DFIG-infinite system

Crowbar 动作值 $I_{r,th} = 2$ p.u. 时 Crowbar 投入, 小于返回值 $I_{r,re} = 1.5$ p.u. 并延时一个同步周期后切除 Crowbar。

5.1 Crowbar 切除后转子电流表达式验证

为了验证所推导的 Crowbar 切除后转子电流表达式的正确性, 以便由此计算转子电流最大值, 采用 Crowbar 传统控制策略分别对 60% 和 80% 电压跌落深度下的故障情况进行了仿真。为了方便观察 Crowbar 切除后的转子电流将出现的最大值, 仿真过程只进行第一次的转子 Crowbar 投入与切除。

图 4 为按照式 (11) 得到的转子电流计算结果与仿真结果的对比 (转子电流为标么值, 后同), 图中实线为仿真结果, 虚线为计算结果。可以看出, 由式 (11) 所得到的计算结果曲线与仿真结果曲线基本吻合, 说明推导的表达式能够准确反映 Crowbar 切除后转子电流的暂态过程。

由图 4 可知, 电压跌落深度为 60% 时, Crowbar 切除于 0.078 9 s, 转子电流最大值出现于 0.089 5 s, 其值为 1.772 p.u., 由式 (10) 得到的计算结果为 1.829 p.u.; 当跌落深度为 80% 时, Crowbar 在 0.079 2 s 切除, 转子电流在 0.090 1 s 出现最大值 2.097 p.u., 由式 (10) 计算的结果为 2.11 p.u.。可以看出, 由式

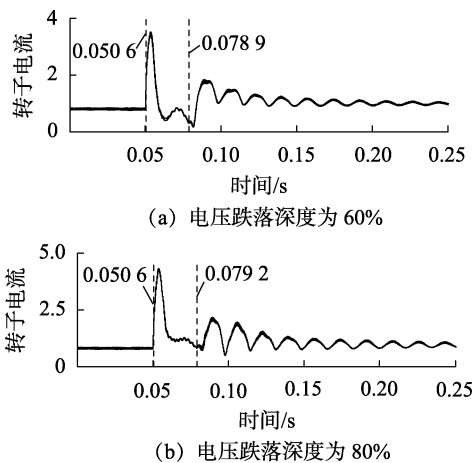


图 4 转子电流计算结果与仿真结果对比

Fig.4 Comparison between calculative and simulative results of rotor current

(10) 计算的假设 Crowbar 切除后转子电流将出现的最大值与仿真结果基本吻合, 验证了式 (10) 的正确性, 为寻找 Crowbar 切除时刻的有效控制提供了前提保证。

5.2 LVRT 方案比较

为了体现本文所提的 Crowbar 自适应切除控制策略的优势, 分别采用 Crowbar 传统控制策略和本文所提策略对定子电压跌落深度为 60% 和 80% 的故障进行了仿真, 仿真结果如图 5 和图 6 所示。图中, 实线代表 Crowbar 传统控制策略, 虚线代表本文所提出的控制策略。

从图 5 可知, 当电压跌落深度为 60% 时, Crowbar 于 0.050 6 s 投入; 采用传统控制策略时, Crowbar 于 0.078 9 s 切除, 采用本文所提策略时则于 0.057 6 s 切除, 相对提早了 21.3 ms。这是由于采

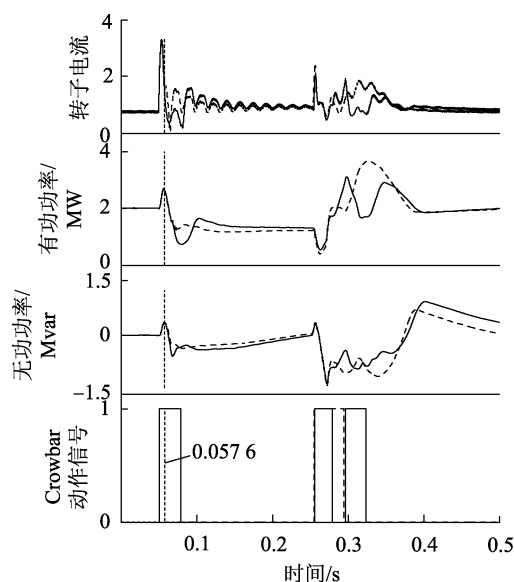


图 5 跌落深度为 60% 时的 LVRT 方案效果对比

Fig.5 Comparison between two LVRT strategies under 60% voltage dip

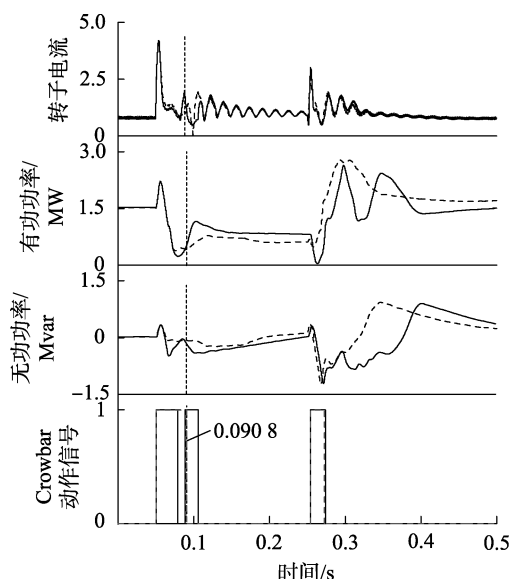


图6 跌落深度为80%时的LVRT方案效果对比

Fig.6 Comparison between two LVRT strategies under 80% voltage dip

用传统控制策略时,当转子电流已经被抑制后Crowbar没有及时切除,增加了DFIG作为异步电动机投入且吸收系统无功的时间;而本文提出的自适应切除策略能够实现Crowbar尽早切除,使Crowbar动作持续时间尽可能缩短,从而减少了DFIG从系统吸收的无功功率。

由图6可知,当电压跌落深度为80%时,Crowbar于0.0506s投入;采用传统控制策略时,Crowbar于0.0792s第1次切除,于0.0886s再次投入,于0.1060s最终切除;而采用本文所提自适应策略时,Crowbar则于0.0908s一次性切除。通过分析可以看出,采用传统控制策略导致故障发生后Crowbar反复投切了2次,故障期间总的投入时间为46ms;本文所提方案下Crowbar投入时间缩短了5.8ms,且在整个故障期间只投入1次,不仅减少了故障期间DFIG作为异步机运行从系统吸收的无功,还有效降低了对风机及其控制装置安全的影响。

6 结论

本文在分析DFIG LVRT中Crowbar切除后暂态过程的基础上,提出了一种Crowbar自适应切除控制策略,可以得出以下结论:

- a. 所提策略在不同故障程度下都能保证Crowbar以不反复投切为前提尽早切除;
- b. 相较于传统Crowbar控制策略,所提策略缩短了Crowbar的投入时间,达到从系统少吸收无功和降低对风机及其控制装置安全影响的效果。
- c. 所提策略无需考虑风机的具体控制参数,在不同的控制策略下均可以确定出Crowbar切除的合理时刻,因此具有一定的适用性。

参考文献:

- [1] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154.
- YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(19):5145-5154.
- [2] 杨堤,程浩忠,马紫峰,等. 基于储能技术提高风电机组低电压穿越能力的分析和展望[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):1-10.
- YANG Di, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Analysis and prospect of LVRT improvement based on energy storage technology for wind turbine generator system[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):1-10.
- [3] 李生虎,黄杰杰,吴正阳,等. 基于故障电流解析表达的FCL协助DFIG低电压穿越研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):8-13.
- LI Shenghu, HUANG Jiejie, WU Zhengyang, et al. LVRT of DFIG with FCL based on analytical expression of fault current[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):8-13.
- [4] RAHIMI M, PARNIANI M. Efficient control scheme of wind turbines with doubly fed induction generators for low-voltage ride-through capability enhancement[J]. IET Renewable Power Generation,2010,4(3):242-252.
- [5] 尹俊,李彦彬,熊军华,等. 双馈风电场群短路电流计算与故障分析方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):113-122.
- YIN Jun, LI Yanbin, XIONG Junhua, et al. Short circuit current calculation and fault analysis method of DFIG wind-farm groups[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):113-122.
- [6] 张学广,徐殿国,李伟伟. 双馈风力发电机三相短路电流分析[J]. 电机与控制学报,2008,12(5):493-497.
- ZHANG Xueguang, XU Dianguo, LI Weiwei. Analysis of three-phase short circuit current of doubly fed induction generator[J]. Electric Machines and Control,2008,12(5):493-497.
- [7] 翟佳俊,张步涵,谢光龙,等. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化,2013,37(3):18-23.
- ZHAI Jiajun, ZHANG Buhan, XIE Guanglong, et al. Three-phase symmetrical short-circuit characteristics analysis of wind turbine driven DFIG with Crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(3):18-23.
- [8] 杨淑英,孙灯悦,陈刘伟,等. 基于解析法的电网故障时双馈风力发电机电磁暂态过程研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(增刊1):13-20.
- YANG Shuying, SUN Dengyue, CHEN Liuwei, et al. Study on electromagnetic transition of DFIG-based wind turbines under grid fault based on analytical method[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(Supplement 1):13-20.
- [9] JIN Yang, FLETCHER J E, O'REILLY J. A series-dynamic-resistor-based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(2):422-432.
- [10] 徐殿国,王伟,徐宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):29-36.
- XU Dianguo, WANG Wei, XU Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on

- Crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36.
- [11] 郑涛,魏占朋,迟永宁,等. 考虑撬棒保护动作时间的双馈式风电机组短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 25-30.
- ZHENG Tao, WEI Zhanpeng, CHI Yongning, et al. Short-circuit current characteristic of doubly fed induction generator considering Crowbar protection insertion time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 25-30.
- [12] 朱晓东,石磊,陈宁,等. 考虑 Crowbar 阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 84-89.
- ZHU Xiaodong, SHI Lei, CHEN Ning, et al. An analysis on low voltage ride through of wind turbine driven doubly fed induction generator with different resistances and quitting time of Crowbar[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 84-89.
- [13] 张曼,姜惠兰. 基于撬棒并联动态电阻的自适应双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 271-278.
- ZHANG Man, JIANG Huilan. Adaptive low voltage ride-through of doubly-fed induction generators based on Crowbar with a parallel dynamic resistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 271-278.
- [14] 赵霞,王倩,邵彬,等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64.
- ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.
- [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] 姜惠兰,李天鹏,吴玉璋. 双馈风力发电机的综合低电压穿越策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 2062-2068.
- JIANG Huilan, LI Tianpeng, WU Yuzhang. Integrated strategy for low voltage ride through of doubly-fed induction generator[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 2062-2068.
- [17] 杨淑英,陈银,周天保,等. 低电压穿越过程中双馈风电机组虚拟电感暂态自灭磁控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 12-18.
- YANG Shuying, CHEN Yin, ZHOU Tianbao, et al. Virtual inductance based self-demagnetization control for doubly-fed induction generator wind turbines during low voltage ride-through process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 12-18.
- [18] 郑重,杨耕,耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 7-15.
- ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. Short circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with Crowbar protection under grid faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 7-15.
- [19] 凌禹,高强,蔡旭. 紧急变桨与撬棒协调控制改善双馈风电机组低电压穿越能力[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 18-23.
- LING Yu, GAO Qiang, CAI Xu. Improvement of low-voltage ride-through by coordinated pitch control and Crowbar control for DFIG wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 18-23.

作者简介:



姜惠兰(1965—),女,天津人,副教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统分析与控制、智能系统及其在电力系统中的应用(E-mail: hljiang@tju.edu.cn)。

Adaptive deactivating control strategy of Crowbar for LVRT capability enhancement of DFIG

JIANG Huilan, ZHOU Tao, JIA Yanqi, CHEN Juan, ZHANG Chi, ZHOU Zhaoqing, XUE Jingwei
(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In view of the imperfect performance of conventional Crowbar control strategy, the rotor current after deactivating Crowbar under three-phase short circuit of the DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) system is deduced, and an adaptive deactivating control strategy of Crowbar is proposed. The maximum value of the rotor current that will appear is real-timely calculated assuming cutting off the Crowbar circuit at the current moment, and then the Crowbar is deactivated when the calculated maximum value is less than the operating value of Crowbar. It is ensured that the Crowbar is deactivated as soon as possible without the possibility of being reactivated, and the purpose of reducing the absorbed reactive power from the system as well as prolonging the service life of the switching devices can be achieved. Simulative results with MATLAB/Simulink verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: doubly-fed induction generator; low voltage ride-through; Crowbar; adaptive control; wind power