基于模糊切换的 DFIG 转子串联双动态电阻 LVRT 优化控制

张文娟1,马浩淼2,张飞鸽1,韩芝侠1

(1. 宝鸡文理学院 电子电气工程学院,陕西 宝鸡 721007;2. 陕西师范大学 计算机科学学院,陕西 西安 710062)

摘要:针对双馈感应风力发电机(DFIG)转子串联单电阻不能满足高性能低电压穿越(LVRT)需求的问题,提出了基于模糊切换的DFIG转子串联双动态电阻LVRT优化控制策略。建立LVRT期间DFIG转子串联阻尼电阻的数学模型,剖析串联电阻对转子磁链、电流、电压及温度的影响机理。根据实际中不同电网电压跌落深度和转子电流大小的逻辑关系,设计转子串联双动态电阻开关信号模糊控制器,对其切换状态进行全面、详细、精确的控制。仿真和实验结果表明,所提控制策略可根据电网电压跌落深度和转子电流幅值的不同,快速、准确地选择相应电阻值,在有效抑制LVRT期间转子过流、直流母线过压的同时,减小了转子串联电阻消耗的有功功率,促进了电网跌落电压的快速恢复,提高了LVRT期间机组整体安全性能。 关键词:DFIG:LVRT;转子串联双动态电阻;模糊切换;优化

中图分类号:TM 614;TM 301.2 ______文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105005

0 引言

双馈感应风力发电机(DFIG)因其具有有功、无 功功率解耦,能量四象限运行可控,双馈变流器容量 小、造价低等优点长期占据风电市场主流机型的位 置^[1]。但DFIG的定子侧直接与电网相连,对电网故 障电压跌落导致的低电压穿越(LVRT)耐受力不 强^[2],风电场因LVRT控制不当产生的机组解列将严 重威胁风电产业链的安全。因此,如何有效提升 LVRT过程的安全性能已成为风力发电领域众多学 者重点关注和认真研究的热点。

在软件方面,通过改进转子励磁变流器的控制 策略抑制LVRT过程转子过流或对暂态磁链加速衰 减,以减小功率、转矩脉动。在高性能抑制过流方 面,文献[3]提出了一种改进的前馈控制策略,考虑 电网电压跌落暂态特性,将估算的转子负序反电动 势和暂态分量叠加到转子励磁变流器待调制电压模 块中,从而对转子过流进行抑制。文献[4]推导了定 子暂态磁链引起的转子电流数学表达式,发现转子 暂态电流近似与定、转子漏抗之和成反比,故可利用 虚拟电感技术增大转子等效漏感,抑制转子过流提 高电流控制能力。在加速暂态磁链衰减方面,文献 [5]采用典型的控制策略,舍弃LVRT过程有功、无 功功率的控制能力,利用转子侧励磁变流器的指令

收稿日期:2020-06-15;修回日期:2021-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207002);陕西省科 技厅工业攻关项目(2018GY-066)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207002) and the Industrial Research Project of Science and Technology Department of Shaanxi Province (2018GY-066) 分量对所测的定子磁链进行全补偿,以达到加速磁链衰减的目的。该方法的不足之处在于无法为故障电网提供无功支撑。此外,软件方面内模控制、滑模控制等新型策略均有较强的抗干扰能力,亦能有效提升LVRT过程机组的安全性^[6-8]。分析上述软件控制算法,其共同点均是对系统参数有较强的依赖性,并且当电压出现大值跌落时,受DFIG及变流器容量限制,软件的补偿效果亦受限。

在硬件方面,通过附加LVRT辅助装置提升机 组的安全性能。目前,对于商用的MW级DFIG而 言,行之有效的方法是在DFIG的转子侧附加合适的 撬棒(Crowbar)保护^[9-10]。Crowbar保护的实质是在 LVRT过程中适时投入卸荷电阻,以消耗过多的暂态 能量。Crowbar保护操作简单,成本低,但运行过程 需封锁转子励磁变流器脉冲,而后DFIG变为普通的 异步电机工作,不但无法为电网提供无功支撑,还需 从电网吸收大量无功以补充交流励磁^[11]。针对上述 不足,文献[12]根据Crowbar保护原理提出了转子串 联阻尼电阻(RSDR)控制策略,通过对LVRT期间 DFIG有功、无功功率进行合理分配,使机组达到良 好保护性能的同时,促进跌落电压的快速恢复。

分析上述RSDR控制策略发现,因电网故障、风 速多变等因素影响,DFIG在不同LVRT时期的暂态 响应各异,转子侧串联单个、固定电阻很难满足不同 电压跌落深度时的良好穿越效果。基于此,本文提 出转子串联双动态电阻(RSDDR)模糊切换控制策 略。在剖析串联电阻对定/转子磁链衰减、电压、电 流大小及电阻自身温度变化等因素影响的基础上, 根据不同电网电压跌落深度,提出采用模糊控制对 RSDDR投切策略进行控制,相比传统的逻辑关系仅 依靠单一判据对电阻投切进行控制的原则,模糊控制 能综合权衡电压跌落深度和转子电流阈值2个方面 因素,制定更全面、更详细、更精确的双电阻投入规则,并且模糊控制具有动态性能好、适应性强的特点, 能有效增强系统的稳定性,提高机组的LVRT性能。

1 RSDR理论分析

1.1 RSDR 基本结构

RSDR的控制原理为:当电网正常运行时,转子 侧串联的电阻 R_s被短接,系统不受任何影响;当电 网电压跌落,机组参数达到某阈值时, R_s串联于 DFIG转子回路中释放过剩能量。含RSDR的DFIG 示意图见附录A图A1^[13]。

1.2 DFIG 数学模型

采用电动机惯例,同步旋转坐标系下DFIG的数 学模型为^[14]:

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_{s} = \boldsymbol{R}_{s}\boldsymbol{i}_{s} + \mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{s}/\mathrm{d}t \\ \boldsymbol{u}_{r} = \boldsymbol{R}_{r}\boldsymbol{i}_{r} + \mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{r}/\mathrm{d}t - \mathrm{j}\boldsymbol{\omega}_{r}\boldsymbol{\psi}_{r} \end{cases}$$
(1)

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_{s} = L_{s}\boldsymbol{i}_{s} + L_{m}\boldsymbol{i}_{r} \\ \boldsymbol{\psi}_{s} = L_{m}\boldsymbol{i}_{s} + L_{s}\boldsymbol{i}_{s} \end{cases}$$
(2)

其中, $u_s = u_{sd} + ju_{sq}$ 和 $u_r = u_{rd} + ju_{rq}$ 、 $i_s = i_{sd} + ji_{sq}$ 和 $i_r = i_{rd} + ji_{rq}$ 及 $\psi_s = \psi_{sd} + j\psi_{sq}$ 和 $\psi_r = \psi_{rd} + j\psi_{rq}$ 分别为定子和转子侧电 压、电流及磁链矢量; ω_r 为转子滑差角频率; L_m 为定、 转子互感; $L_s = L_{\sigma s} + L_m$ 、 $L_r = L_{\sigma r} + L_m$ 分别为定、转子自 感, $L_{\sigma s}$ 、 $L_{\sigma r}$ 分别为定、转子漏感; R_s 、 R_r 分别为定、转子 电阻。基于式(1)、(2),DFIG等效电路如图1所示, 图中 ω_s 为定子角频率。



图 1 DFIG 等效电路 Fig.1 Equivalent circuit of DFIG

根据式(2),可得定、转子电流为^[15]:

$$\begin{cases}
\mathbf{i}_{s} = \frac{L_{r} \boldsymbol{\psi}_{s} - L_{m} \boldsymbol{\psi}_{r}}{L_{s} L_{r} - L_{m}^{2}} \\
\mathbf{i}_{r} = \frac{L_{s} \boldsymbol{\psi}_{r} - L_{m} \boldsymbol{\psi}_{s}}{L_{s} L_{r} - L_{m}^{2}}
\end{cases}$$
(3)

1.3 RSDR对LVRT特性影响分析

RSDR能有效抑制LVRT期间定、转子过流,提高系统稳定性,本文从以下3个方面加以讨论。

1.3.1 转子磁链衰减分析

假设稳态时电网电压幅值为*U*₀,在*t*=*t*₀时刻发 生对称跌落,则跌落前、后定子电压为:

$$\boldsymbol{u}_{s} = \begin{cases} \boldsymbol{U}_{0} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\boldsymbol{\omega}_{s}t} & t < t_{0} \\ \boldsymbol{p} \boldsymbol{U}_{0} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\boldsymbol{\omega}_{s}t} & t \ge t_{0} \end{cases}$$
(4)

其中,p为电压跌落后的保留部分,则电压跌落深度

为1-p; $t_0=0$, $t < t_0$ 、 $t \ge t_0$ 分别表示跌落前、后。

根据磁链与电压关系,基于式(2),忽略定子电 阻,可得电压跌落前、后定子磁链为:

$$\boldsymbol{\psi}_{s} = \begin{cases} (1-p)U_{0}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_{s}t}/(\mathrm{j}\omega_{s}) & t < t_{0} \\ pU_{0}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_{s}t}/(\mathrm{j}\omega_{s}) & t \ge t_{0} \end{cases}$$
(5)

为了研究LVRT期间定子磁链和转子电流的暂态特性,令转子侧开路,即*i*_r=0,结合式(1)、(2)可得定子磁链微分方程的解为:

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}/\mathrm{d}t = \boldsymbol{u}_{\mathrm{s}} - R_{\mathrm{s}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}/L_{\mathrm{s}} \tag{6}$$

考虑定子磁链包含同步速旋转的定子磁链分量 ψ_{ss} 和电压突然跌落引起的直流分量 ψ_{sd} 这2个部分, 结合式(4),可得LVRT期间定子磁链暂态分量为:

$$\boldsymbol{\psi}_{s} = \boldsymbol{\psi}_{sdc} + \boldsymbol{\psi}_{ss} = \frac{(1-p)U_{0}e^{j\omega_{s}t}}{j\omega_{s}}e^{-R_{s}t/L_{s}} + \frac{pU_{0}e^{j\omega_{s}t}}{j\omega_{s}} = \frac{(1-p)U_{0}}{j\omega_{s}}e^{-t/T_{s}} + \frac{pU_{0}e^{j\omega_{s}t}}{j\omega_{s}}$$
(7)

其中, $T_s = L_\sigma/R_s$ 为定子磁链衰减时间常数, $L_\sigma = L_{\sigma s} + L_{\sigma r}$ 为定、转子漏感之和。

与定子磁链分析相似,为了保持转子磁链稳定, 其暂态表达式也由同步速旋转的转子磁链分量 ψ_{ss} 和电压突然跌落引起的直流分量 ψ_{re} 两部分构成,即:

$$\boldsymbol{\psi}_{r} = \boldsymbol{\psi}_{rdc} + \boldsymbol{\psi}_{rs} = \boldsymbol{\psi}_{rdc} e^{j\boldsymbol{\omega}_{r}t} e^{-i\boldsymbol{U}_{r}} + \boldsymbol{\psi}_{rs0} e^{j\boldsymbol{\omega}_{s}t}$$
 (8)
其中, $T_{r} = L_{\sigma}/R_{r}$ 为转子磁链衰减时间常数; $\boldsymbol{\psi}_{rdc0}$ 为电
压跌落引起的转子磁链直流分量初始值, U_{r} 衰减;
 $\boldsymbol{\psi}_{rd0}$ 为以同步速旋转的转子磁链分量初始值。

考虑最严重情况,假设定子三相电压跌至0,即 *p*=0,将式(7)、(8)代入式(2),则LVRT期间定、转子 电流的关系为^[16]:

$$\boldsymbol{i}_{s} = -\boldsymbol{i}_{r} = \frac{U_{0}}{j\boldsymbol{\omega}_{s}L_{\sigma}} \left[e^{-t/T_{s}} - e^{j(\boldsymbol{\omega}_{s}t-\alpha)} e^{-t/T_{r}} \right]$$
(9)

其中, α 为d轴与定子磁链的夹角。由于 $L_m \gg L_{\sigma s}$, $L_m \gg L_{\sigma r}$,根据式(9)可得暂态情况下定、转子电流最 大幅值近似为:

$$I_{\rm smax} = I_{\rm rmax} \approx 2U_0 / (\omega_{\rm s} L_{\sigma}) \tag{10}$$

当电压跌落时,双馈电机定、转子电流增大,当 传感器检测到转子电流大于阈值时,转子侧电阻 R_s 快速串入回路卸荷多余能量,定子侧仍然与电网连 接,此时 DFIG 等效电路如图2所示。



图2 RSDR投入后DFIG等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of DFIG with RSDR

関设
$$R_{rs} \gg R_s, R_{rs} \gg R_r, 定 、转子等效阻抗为:
$$\begin{cases}
Z'_s = (s^2 L_m L_\sigma + s L_s R_{rs})/(s L_s + R_{rs}) \\
Z'_r = s L_\sigma + R_{rs}
\end{cases}$$
(11)$$

其中,Z'_s、Z'_r分别为定、转子等效阻抗;s为转差率。 RSDR投入后定、转子磁链直流分量衰减时间常数为:

$$\begin{cases} T'_{\rm s} = (R^2_{\rm rs} + \omega^2_{\rm s} L_{\rm s} L_{\sigma}) / \left[\omega^2_{\rm s} (L_{\rm s} - L_{\sigma}) R_{\rm rs} \right] \\ T'_{\rm r} = L_{\sigma} / R_{\rm rs} \end{cases}$$
(12)

由于*R_{rs}*≫*R_r*,则*T'_r*<*T_r*,RSDR减小了转子磁链 衰减时间常数,增大了直流分量衰减速度,使DFIG 能尽早进入可控区,提高了LVRT稳定性。

1.3.2 转子电压、电流影响分析

将式(11)、(12)代入式(9)中,可得转子串联电 阻后,电压跌落深度为100%(即p=0)时定、转子电 流近似为^[17]:

$$\boldsymbol{i}_{s0} = -\boldsymbol{i}_{r0} \approx \frac{j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{\psi}_{s0}}{j\boldsymbol{\omega}_{s}L_{\sigma} - R_{rs}} e^{-i/T_{s}'} - \frac{\boldsymbol{\psi}_{s0}}{L_{\sigma}} e^{-j\boldsymbol{\omega}_{s}t} e^{-t/T_{s}'} \quad (13)$$

附录A图A2给出了转子串联不同*R*_s时电流曲 线变化关系,DFIG₁的仿真参数见附录A表A1。可 以看出,LVRT过程中转子无电阻串入时,转子电流 的直流分量出现较大过流,且衰减过程缓慢;串入不 同幅值的*R*_s后,电压跌落瞬间电流直流分量的过流 显著减小,且随着*R*_s的增大,电流幅值及暂态衰减 时间均减小。说明合适的转子串联电阻值对LVRT 过程中转子过流的直流分量有较好的抑制作用。

基于式(12)和附录 A 图 A2 可知, R_s越大,转子 磁链衰减时间常数 T'_i与之前的 T_i相比,其值越小, 代入式(13)可得约等于号右边的第二项比第一项衰 减速度快,因此,LVRT期间故障电流主要取决于式 (13)约等于号右边的第一项,其幅值可近似表示为:

$$I_{\rm smax} = I_{\rm rmax} \approx U_0 / \sqrt{\left(\omega_{\rm s} L_{\sigma}\right)^2 + R_{\rm rs}^2}$$
(14)

考虑转子电压约束条件,设U_{max}为转子励磁变 流器所能承受的最大耐压值,则:

$$U_{\rm rmax} = I_{\rm rmax} R_{\rm rs} \tag{15}$$

附录A图A3给出了转子电流、电压随*R*。的变化曲线,可以看出随着*R*。的增加,转子电流幅值减小而电压幅值增大。

当*p*≠0时,由式(4)—(7)可知,定、转子磁链中 除直流分量外,还存在交流分量,则定、转子电流由 衰减和非衰减2个部分构成,其幅值表达式近似为:

$$I_{\rm smax} = I_{\rm rmax} \approx \frac{U_0}{\sqrt{\left(\omega_{\rm s}L_{\sigma}\right)^2 + R_{\rm rs}^2}} \left[(1-p) e^{-1/T_{\rm s}'} + p \cos\left(\omega_{\rm s}t + \theta\right) \right]$$
(16)

其中, θ为电压跌落前转子磁链角。

附录A图A4给出了p不同、 R_{s} 相同时和p相同、 R_{s} 不同时转子电流变化曲线。可以看出,对于相同的 R_{s} ,p越大,LVRT期间转子电流越小;对于相同的p, R_{s} 越大,转子电流越小。这说明RSDR对LVRT过 程转子过流的交、直流分量均有较好的抑制作用。 1.3.3 电阻温度影响分析

 $R_{\rm s}$ 的大小还受其工作时自身温度的限制,若 $R_{\rm s}$ 太小,则LVRT过程中较大过流引起的快速温升将损坏电阻。根据文献[18], $R_{\rm s}$ 的温度上升值 ΔT 满足:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = P_{\max} \left(\frac{1}{q_v c} + \frac{1}{\lambda A} \right) \leq \Delta T_{\max} \quad (17)$$

其中, ΔT_1 为冷却介质的温度上升值; ΔT_2 为电阻工作时的温度值; ΔT_{max} 为 R_{rs} 最高允许温度; $P_{max} = U_r^2/R_{rs}$ 为 R_r 的最大允许功率, U_r 为转子电压幅值; q_v 、 c,λ 和A分别为冷却介质的体积、比热容、传热系数和传热面积。

设 $\xi = \frac{1}{q_v c} + \frac{1}{\lambda A} \beta R_{r_s}$ 的功率校正系数,则根据式

(17)可得考虑温度限制时, R_s的取值范围为:

$$R_{\rm rs} \ge U_{\rm r}^2 \xi / \Delta T_{\rm max} \tag{18}$$

图3给出了不同 R_s (标幺值)工况下的温度上升值(标幺值)曲线,可以看出,随着 R_s 的减小,LVRT过程中 ΔT 呈现先增大后减小的趋势。



图 3 R_{is}不同时的温度曲线

Fig.3 Temperature curve with different values of R_{rs}

综合上述 RSDR 控制对 LVRT 特性影响分析可 知, *R*_s越小, LVRT 过程中抑制转子过流的效果越 差,转子电压越小, 自身温度上升越大, 电阻越容易 损坏; 反之, *R*_s越大, LVRT 过程中抑制转子过流的 效果越好, 但较大的 *R*_s会造成转子过压, 增加有功 功率消耗, 从而减小 LVRT 期间 DFIG 定子侧输出的 有功功率。

2 RSDDR模糊切换控制策略

2.1 RSDDR 切换控制原理

实际风电场中电网因故障不同而导致电网电压 跌落深度多变。若*R*。按照最严重电网电压跌落情 况整定,则较大的阻值在小幅度跌落时将引起转子 侧过压,增加机组有功功率损耗,降低直流母线电 压,严重时引起系统不稳定。反之,按照最小电网电 压跌落深度基准设计的电阻值则不能很好地抑制发 生故障时的定、转子过流。

基于此,本文在上述讨论基础上,根据电压跌落 深度及转子电流阈值大小,提出 RSDDR 切换控制策 略,根据 LVRT 时的电网电压跌落深度及转子电流 大小在 2个电阻(*R*_{s1}和*R*_{s2})之间进行灵活切换。具 体控制规则如附录 A 图 A5 所示。由图 A5 可知:①

当系统检测到电网电压跌落后的剩余残压 $U \leq U_{2N}$ 且 $U \leq U_{1N}$ 时,或当系统检测到转子实际电流与额定电流差大于 ΔI_{rl} 时,表明电网发生了较严重的跌落故障,转子过流较大,此时转子侧投入较大电阻 R_{rsl} ; ②当系统检测到电网电压跌落后的剩余残压U满足 $U_{2N} < U \leq U_{1N}$ 且转子实际电流与额定电流差 ΔI_r 满足 $\Delta I_{r2} < I_r - I_{re} < \Delta I_{rl}$ 时,表明电网电压跌落深度不大且转子无较大过流,此时转子侧投入较小电阻 R_{rs2} 。

2.2 RSDDR模糊切换控制器结构设计

基于上述分析,RSDDR 切换控制策略可满足 LVRT时机组保护要求,但传统的逻辑关系不能描述 附录A图A5所示的复杂工况(不同电网电压跌落深 度和不同转子电流大小)下各种参数阈值的组合情 况。基于此,本文提出采用模糊控制来设计RSDDR 的切换策略,从而制定更全面、更详细的转子电阻投 入规则,且模糊控制具有动态性能好、适应性强的特 点,能较快、较准确地控制*R*_{ssl}或*R*_{ss2}的投入,从而提 高LVRT时机组整体的安全性能。RSDDR模糊切换 控制器结构设计如图4所示^[19]。



图4 RSDDR模糊切换控制器结构

Fig.4 Structure of RSDDR fuzzy switching controller

根据图4所示结构,RSDDR模糊切换控制器设计可分为以下4个步骤^[20]。

(1)确定系统输入、输出变量。

RSDDR模糊切换控制器采用双输入单输出结构对LVRT期间多余能量进行调节,输入量分别取p和转子电流幅值I_r,输出量为控制R_{rs1}和R_{rs2}投入工作的开关信号δ。

(2)输入、输出变量模糊化。

模糊控制器的输入必须通过模糊化才能用于 控制输出的求解。在实际工况中,p的取值范围为 [0,1],设计转换公式 $p_i = \frac{p-50\%}{25\%}$,则模糊化之后电 压跌落保留部分 p_i 的模糊基本论域取为[-2,2],将 p_i 的量化等级设为3级,即 $\{-2,0,2\}$,对应的模糊 语言为 $\{NB,ZO,PB\}$,此时该集合中元素分别表示 电网电压有较小跌落、无跌落、有较大跌落。同 理,通常情况下,转子励磁变流器所允许的最大电 流 I_{max} 为其额定电流 I_{e} 的2倍,设计转换公式 $I_{d} = \frac{100\% I_i / I_e - 150\%}{25\%}$,则模糊化之后转子电流 I_{d} 的模 糊基本论域为[-2,2],将 I_{d} 的量化等级设为3级,即 $\{-2,0,2\}$,对应的模糊语言为 $\{NB,ZO,PB\}$,此时该 集合中元素分别表示转子有较小过流、无过流、有较 大过流。

模糊控制器的输出为控制*R*_{s1}和*R*_{s2}投入工作的 开关信号δ,其取值范围为[-1,1],因此,模糊化中 比例因子为1,输出的基本论域也为[-1,1],将δ的 量化等级设为3级,即{-1,0,1},对应的模糊语言为 {NB,ZO,PB},此时该集合中元素分别表示投入较 大电阻、不投入电阻、投入较小电阻。

完成上述输入、输出变量模糊化之后,下一步定 义各模糊语言变量对应的模糊子集。定义模糊子集 实际上是确定模糊子集隶属度函数曲线的形状,将 确定的隶属度函数曲线离散化,就得到了有限点上 的隶属度函数,从而构成了相应模糊变量的模糊子 集。在RSDDR 切换控制过程中,考虑到电网电压跌 落深度的产生是随机的,同时为了简化计算,输入、 输出变量的模糊子集均采用三角隶属度函数,参照 上述模糊论域定义,根据LVRT控制经验对模糊变 量赋值,得到模糊集基本论域范围内 p_{cl} . δ 从属于 各模糊子集的隶属度函数如图5所示。由图可知, 在[-2,-0.4]的基本论域范围内,基本论域点为-2的 变量所对应的属于模糊语言集合元素 NB 的隶属度 函数值最大;在[-1.6,1.6]的基本论域范围内,基本 论域点为0的变量所对应的属于模糊语言集合元素 ZO的隶属度函数值最大;在[0.4,2]的基本论域范 围内,基本论域点为2的变量所对应的属于模糊语 言集合元素 PB 的隶属度函数值最大。



Fig.5 Membership functions of input and output variables

(3)确定开关信号δ模糊控制规则。

模糊控制规律为找出不同时刻 $\delta = p_r \pi I_r$ 之间 的模糊关系,通过不断检测 $p_r \pi I_r$,根据模糊控制原 理对 δ 进行在线修改,以满足不同的 $p \pi I_r$ 对LVRT 的要求,使LVRT期间DFIG具有良好的安全及动、 静态性能。根据DFIG的LVRT过程模拟并参考文 献[18]所得结论,共总结出表1所示9条控制规律。

根据上述规则,模糊控制器的三维结构如附录 A图A6所示。可以看出,控制器的2个输入变量经 过模糊控制规则之后,输出信号为1、-1和0,分别表 示电压跌落较小时投入小电阻、电压跌落较大时投 入大电阻以及无跌落时不投入电阻。

(4)输出变量清晰化。

表1 不同 p_{f} 、 I_{e} 的模糊语言下 δ 的模糊控制规律

Table 1 Fuzzy control rules of δ under different

	ruzzy languag	ges of $p_{\rm f}$ and	I _{rf}	
<i>I_{rf}的模糊</i> 语言	δ的模糊控制语言			
	$p_{\rm f}$ 的模糊	$p_{\rm f}$ 的模糊	$p_{\rm f}$ 的模糊	
	语言为NB	语言为ZO	语言为PB	
NB	ZO	PB	NB	
ZO	ZO	PB	NB	
PB	PB	NB	NB	

模糊控制器的输出变量 δ 不能直接用来控制 R_{rsl} 或R_s的投入,必须将其转化为精确量,本文为了更 好地反映开关信号的真实情况,采用重心法对δ进 行清晰化处理。

仿真分析和实验验证 3

3.1 仿真分析

根据文献[15]所提RSDR整定方法,取LVRT期 间所允许的最大转子电流为1.5倍额定转子电流,得 出RSDR的取值范围,结合式(18)所示限值表达式, 取修正系数为7,若冷却介质为水,在满足电阻最高 允许温度为750K的情况下,选择转子侧串联的2个 电阻值分别为R_{s1}=0.38 p.u.、R_{s2}=0.17 p.u.。下面在 不同的电压跌落深度下,验证RSDDR模糊切换控制 算法的有效性,并分别与目前常用的Crowbar保护及 RSDR控制相比较。DFIG,仿真参数见附录A表A1。 3.1.1 与Crowbar保护相比较

假设t=4 s时电网电压跌落至额定电压的70%, 跌落持续时间为625 ms, DFIG的转子转速为0.8 p.u., 风速为12m/s。

图6为采用RSDDR模糊切换控制(在电压发生 较小跌落时 R_{rs} 投入工作)和转子Crowbar保护时转 子电流I,及定子电压U,的仿真结果(I,、U,均为标幺 值)。可以看出,采用Crowbar保护时,LVRT期间转 子电流最大值为0.74 p.u. 左右;而采用RSDDR模糊 切换控制时转子电流最大值降为0.7 p.u. 左右, 且电 流的暂态振荡过程减小。Crowbar保护投入后,当定 子电压跌落时,DFIG工作在普通异步电机模式,需 从电网吸收大量无功功率,导致电网故障电压进一





步下降,且电压恢复过程出现过冲和振荡。而RSDDR 模糊切换控制在LVRT过程中无需封锁转子脉冲, 利用投入合适的R.,,快速卸荷转子多余能量,并根据 需要发出一定量的无功功率,促进跌落电压快速恢 复。附录B图B1为2种方法下直流母线电压及有功 功率的波形比较,可以看出,Crowbar保护因要封锁 转子侧脉冲,有功功率几乎下降为0,其投入和切除 破坏了网侧变流器及转子励磁变流器的稳态功率平 衡关系,导致直流母线电压暂态过程呈现较长时间 振荡, 而RSDDR模糊切换控制在抑制母线电压过冲 的同时,能快速达到稳态值。

3.1.2 与 RSDR 控制相比较

RSDR 控制考虑最严重情况,即三相电压跌落 至0(p=0),可得R_w=0.38 p.u.。下面分2种工况进行 讨论:①电网电压在 t=4 s 跌落至额定电压的 80%, 在t=7s跌落至额定电压的30%,在t=8s恢复正常; ②电网电压在t=4s跌落至额定电压的30%,在t=7s 跌落至额定电压的80%,在t=8s恢复正常。

设RSDR控制器输出为1表示电阻投入,输出为 0表示电阻未投入;RSDDR模糊切换控制器的逻辑 设置参见2.2节步骤(3)。

图7给出了工况①下2种控制器的输出信号和 电阻消耗的有功功率Ploss。可以看出,当t=4s电压跌 落至额定电压的80%时,RSDDR模糊切换控制器输 出为1, R_s=0.17 p.u. 投入, 当t=7 s 电压跌落至额定 电压的30%时,RSDDR模糊切换控制器输出为-1, R_{st}=0.38 p.u. 投入,当t=8 s 电压恢复正常时, RSDDR 模糊切换控制器输出为0,转子侧无电阻投入。这 说明RSDDR模糊切换控制可根据电压跌落深度自 动、有选择地投切相应电阻,且投切过程无延迟或故 障跳变,系统稳定性良好。当t=4s电压刚开始跌落 时,RSDR控制器输出为1,R_B=0.38 p.u.投入,当t=8 s 电压恢复时,RSDR控制器输出为0,R。切除。这说 明RSDR控制器输出只有1和0这2种状态,不能根 据电压跌落深度而改变卸荷电阻值。当电网电压跌 落深度较小时,RSDDR模糊切换器中较小电阻R_{s2}



Fig.7 Waveforms of δ and P_{loss} with RSDR and RSDDR controller under Working Condition ①

⁶²

投入,电阻消耗的有功功率明显小于采用RSDR控制 器时电阻消耗的有功功率。当转子励磁变流器功率 一定时,有功功率减小可增加LVRT期间无功功率 给定值,更多地补充电网所需的无功功率,促使跌落 电压快速恢复,同时,吸收较小有功功率可降低所串 电阻的工作热量,增加其使用寿命。附录B图B2为 工况②下2种控制器输出信号和P_{loss}波形,与工况① 相似,再次验证了RSDDR模糊切换控制的优越性。

3.2 实验验证

为了验证所述方法的实际可行性,搭建了基于 DSP28335 控制器的双馈风力发电模拟实验平台。 附录 B 图 B3 为实验平台示意图。实验中所采用的 双馈电机参数为:有功功率*P*=10 kW,*R*_s=0.7 Ω,*R*_r= 0.59 Ω,定子电抗*X*_s=0.66 Ω,转子电抗*X*_r=1.29 Ω,*X*_m= 22.8 Ω,极对数为3。控制器采用8级流水线存储器 的TMS320F28335,指令周期为6.67 ns,经过参数优 化,所设计的模糊控制器计算时间约为359 ns,转子 串联电阻投切所选用的IGBT开通时间约为30 μs, 因此,从跌落故障发生到成功选择并切换电阻所需 时间约为30.359 μs。结合本文所述内容,实验算法 流程图见附录B图 B4。

图 8 和附录 B 图 B5 分别为电网电压跌落至额定 电压的 20%、80%,跌落持续 720 ms 时,转子 Crowbar 保护与 RSDDR 模糊切换控制实验结果。可以看 出,Crowbar 保护中因转子变流器封锁,定子有功功 率几乎降为0,同时 DFIG 作为普通的异步电机运 行,需从电网吸收大量无功功率,导致电网跌落电压 进一步下降;当电压跌落至额定电压的 80%时,由 于单一较大 Crowbar 电阻吸收较多的能量,直流母线 电压 V_{dc}下降了 0.2 p.u.。当电网电压跌落至额定电 压的 20%时,采用 RSDDR 模糊切换控制后阻值较 大的 R_{rs1}投入;当电网电压跌落至额定电压的 80% 时,阻值较小的 R_{rs2}投入。这表明 RSDDR 模糊切换 控制在减少卸荷电阻消耗的有功功率,有效抑制转 子过流、直流母线过压的同时,能够改善电网电压跌 落期间机组的输出功率,促进电网电压快速恢复。



图 8 电网电压跌落至额定电压 20% 时采用 Crowbar 保护与 RSDDR 模糊切换控制的实验结果

Fig.8 Experimental results of adopting Crowbar protection and RSDDR fuzzy switching control when grid voltage decreases to 20% rated voltage

4 结论

电网电压跌落深度不同,DFIG采用RSDR控制 很难达到良好的LVRT效果,本文提出RSDDR模糊 切换控制提升机组的LVRT性能,通过理论分析及 仿真实验结果,得出以下结论:

(1)LVRT期间采用RSDR控制相当于等效增加 转子磁链衰减时间常数,增加了转子电流暂态分量 衰减速度,有效抑制了转子过流和直流母线过压;

(2)RSDDR模糊切换控制考虑了LVRT期间转 子过流、直流母线过压及自身温度限值,在有效卸荷 多余能量的同时,减小了电阻消耗的有功功率及热 量,延长了电阻使用寿命;

(3)RSDDR模糊切换控制可由电网电压跌落深度不同,快速、准确、稳定地选择电阻值,从而有效地对机组进行保护,提高LVRT期间机组的整体性能。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 邵昊舒,王磊,蔡旭.提高双馈风电机组LVRT能力的改进直接功率控制[J].电力自动化设备,2019,39(7):15-22.
 SHAO Haoshu,WANG Lei,CAI Xu. Modified direct power control for improving LVRT ability of doubly fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 15-22.
- [2] 吴志鹏,李银红. 计及撬棒投切的双馈风电机组精细化整定计 算等值模型[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):69-76.
 WU Zhipeng, LI Yinhong. Precise DFIG equivalent model for setting calculation based on activated stage and deactivated stage of Crowbar protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(7):69-76.
- [3] LIU Sumei, YANG Qixun, JIA Ke, et al. Coordinated fault-ridethrough strategy for doubly-fed induction generators with enhanced reactive and active power support[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(2):203-211.
- [4] ZHU D H,ZOU X D,DENG L, et al. Inductance-emulating control for DFIG-based wind turbine to ride-through grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (11):8514-8525.
- [5] XIANG D W, 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.
- [6] CAMPOS-GAONA D, MORENO-GOYTIA E L, ANAYA-LARA O. Fault ride-through improvement of DFIG-WT by integrating a two-degrees-of-freedom internal model control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3):1133-1145.
- [7] MOHSENI M, ISLAM S M. Transient control of DFIG-based wind power plants in compliance with the Australian grid code[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 2813-2824.
- [8] VILLANUEVA I, ROSALES A, PONCE P, et al. Grid-voltageoriented sliding mode control for DFIG under balanced and unbalanced grid faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018,9(3):1090-1098.
- [9] HOSSAIN M E. Low voltage ride-through capability improve-

ment methods for DFIG based wind farm[J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology,2018,5(3):550-561.

- [10] GHOLIZADEH M, ORAEE A, TOHIDI S, et al. An analytical study for low voltage ride through of the brushless doublyfed induction generator during asymmetrical voltage dips[J]. Renewable Energy, 2018, 115:64-75.
- [11] 徐玉琴,曹璐璐.双馈感应发电机暂态特性分析及 Crowbar 阻 值优化[J].电工技术学报,2017,32(4):93-100.
 XU Yuqin,CAO Lulu. Transient characteristics analysis of doubly fed induction generator and resistance optimization of crowbar circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(4):93-100.
- [12] 张文娟,马浩森,张国慨,等.基于转子串联电阻的双馈风力发电机低电压穿越[J].电力自动化设备,2015,35(12):28-33.
 ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, ZHANG Guokai, et al. Low voltage ride-through of doubly-fed induction generator based on rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):28-33.
- [13] 凌禹,蔡旭. 基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越技术
 [J]. 电力自动化设备,2014,34(8):25-30.
 LING Yu, CAI Xu. Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):25-30.
- [14] ZHANG W J, MA H M, ZHANG J L, et al. Multi-objective fuzzy-optimization of crowbar resistances for the low-voltage ride-through of doubly fed induction wind turbine generation systems [J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15(4):1119-1130.
- [15] LOPEZ 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.

- [16] MORREN J, DE HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):174-180.
- [17] LI D D. Analysis and calculation of short circuit current of doubly fed induction generator [C] //2008 IEEE / PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago, IL, USA: IEEE, 2008:1-4.
- [18] DONG H, WU H B, PAN J, et al. Research on double-fed induction generator low voltage ride through based on double braking resistors using fuzzy control[J]. Energies, 2018, 11(5): 1-16.
- [19] MENDES W R, ARAÚJO F M U, DUTTA R, et al. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing [J]. Expert Systems With Applications, 2019, 124:13-24.
- [20] SEDIGHIZADEH M, YARMOHAMMADI H, ESMAILI M. Enhancing FRT performance and smoothing output power of DFIG wind farm equipped by SFCL and SMES in a fuzzy framework[J]. Engineering Science and Technology, 2019, 22 (3):801-810.

作者简介:



张文娟(1981—),女,陕西扶风人,教 授,博士,主要研究方向为风力发电技术、 电力电子技术(E-mail:zhangwj19811130@ 163.com):

马浩森(1978—),女,陕西咸阳人,副 教授,博士,主要研究方向为风力发电及其 控制技术(E-mail:mahaomiao@snnu.edu.cn)。 (编辑 王欣竹)

LVRT optimal control of DFIG using rotor series double dynamic resistance based on fuzzy switching

ZHANG Wenjuan¹, MA Haomiao², ZHANG Feige¹, HAN Zhixia¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721007, China;

2. School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Aiming at the problem that the rotor series single resistance of DFIG (Doubly-Fed Induction wind Generator) cannot meet the demand of high performance LVRT (Low-Voltage Ride-Through). A LVRT optimal control of DFIG using rotor series double dynamic resistance based on fuzzy switching is proposed. A mathematical model for the rotor series damping resistance is established during LVRT period. The relationships between the series resistance and rotor flux linkage, current, voltage and temperature are analyzed. According to the logical relationship between different voltage sag depths and rotor currents, the fuzzy controller of rotor series double dynamic switching signal is designed to control its switching state comprehensively, in detail and precisely. Simulative and experimental results demonstrate that the proposed control strategy can quickly and accurately select corresponding series resistance according to different voltage sag depths and rotor current amplitudes, effectively suppress rotor over-current and DC bus over-voltage during LVRT period. MRT period.

Key words: DFIG; LVRT; rotor series double dynamic resistance; fuzzy switching; optimization

64

附录 A



注: L_s、L_r分别为定、转子侧滤波电感; R_{ch}为直流侧卸荷电阻。 图 A1 含 RSDR DFIG 示意图 Fig.A1 Schematic of DFIG with RSDR



注: R_s、I_r均为标幺值, 后同。 图 A2 R_{sr}不同时 I_r波形 Fig.A2 Waveform of I_r with different R_{rs} 表A1 DFIG仿真参数 Table A1 Simulation parameters of DFIG

参数	DFIG ₁	DFIG ₂
额定功率/MW	2	3
$U_{ m s}/{ m V}$	690	690
频率/Hz	50	50
$L_{\sigma s}$	0.171	0.239
$L_{\sigma r}$	0.156	0.213
$L_{\rm m}$	3.90	3.99
$R_{\rm s}$	0.01	0.013
$R_{ m r}$	0.009	0.024
	R R 内	もたり値





注: U_r为标幺值, 后同。 图A3 不同R_{sr}时I_r、U_r波形 Fig.A3 Waveforms of I_r、U_r with different R_{sr}



图A4 不同 R_{rs} 及p下 I_r 波形 Fig.A4 Waveforms of I_r under different R_{sr} and p



图A5 RSDDR模糊切换控制规则 Fig.A5 Principle of RSDDR fuzzy switching control



图A6 RSDDR模糊切换控制器的三维结构 Fig.A6 Three-dimensional structure of RSDDR fuzzy switching controller 附录 B



注: P、V_{dc}均为标幺值。

图 B1 Crowbar 保护和 RSDDR 模糊切换控制下 P 和 Vdc

波形

Fig.B1 Waveforms of P and V_{de} with Crowbar protection and RSDDR fuzzy switching control



图 B2 工况②中 RSDR 和 RSDDR 模糊切换控制 和 Ploss 波形





(a) DFIG



(b) 双馈变流器及其控制系统
 (c) 电压跌落发生器
 图 B3 DFIG 实验平台
 Fig.B3 Experimental platform of DFIG



图 B4 RSDDR 模糊切换控制流程图

Fig.B4 Flowchart of RSDDR fuzzy switching control





(b) RSDDR 模糊控制
 图 B5 电网电压跌落至额定电压的 80%实验结果
 Fig.B5 Experimental results when grid voltage sag is 80% rated voltage