基于故障电流解析表达的 FCL 协助 DFIG 低电压穿越研究

李生虎,黄杰杰,吴正阳

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要: 双馈感应电机(DFIG)与公共耦合点(PCC)间投入故障电流限制器(FCL)实现低电压穿越(LVRT)时,定子电压受 FCL 阻抗与网侧变流器(GSC)电流影响,无法设定定子电压,需要对 DFIG 与 FCL 整体建模以分析故障电流。基于恒定电流控制策略推导转子侧变流器(RSC)与 GSC 电流,提出 DFIG 故障电流的解析表达式。考虑到电压定向下定子相角振荡会导致 dq 轴恒定电流在 xy 轴下变化,不利于定子电流稳定,采用 dq 轴与 xy 轴相重合的定向方案。对比不同的 RSC 与 GSC 电流参考值、FCL 阻抗值与切出时间下 DFIG LVRT 过程中的电磁转矩振荡,选择 LVRT 性能较好的一组控制参数。仿真结果表明,FCL 阻抗取值受 RSC 与 GSC 电流参考值影响,且 FCL 阻抗越大,所取切出时间越短。

关键词: 双馈感应电机; 故障电流限制器; 恒电流控制; 解析表达; 控制参数选择

中图分类号: TM 614 **文献标识码:** A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.002

0 引言

风电机组需要具有低电压穿越(LVRT)能力[1-2],在不违背其安全约束的前提下,为电网提供部分无功和有功支撑。双馈感应电机(DFIG)的定子与电网直接相连,易受电网电压跌落影响。在 DFIG 机端与公共耦合点(PCC)间投入故障电流限制器(FCL),可提升机端电压,帮助实现故障穿越。

通常 PCC 与定子间阻抗较小,故障后两者电压近似相等,即定子电压跌落幅度确定,因此可忽略网侧变流器(GSC)电流对定子电压的影响,仅基于感应电机方程求解故障电流[3-5]。在 DFIG 机端串联 FCL,增加了定子与 PCC 间阻抗,GSC 电流对定子电压影响较大。文献[6]在 DFIG 机端串联 FCL,假设定子电压已知,不能反映 FCL 阻抗和 GSC 电流的影响。对串联 FCL 进行故障电流分析,需将 DFIG 与 FCL 进行整体建模,从而综合反映转子侧变流器(RSC)、GSC 控制与 FCL 阻抗对故障电流的影响。

考虑 RSC 与 GSC 控制,文献[7]指出功率外环控制在电压骤降的情况下会导致电流参考值剧烈增长,故本文在 LVRT 过程中取消 RSC 与 GSC 功率外环控制而改用恒定电流控制。文献[8]将 RSC 与 GSC 视为恒定电流源求解故障电流,与其功率外环控制相矛盾,且 DFIG 采用稳态模型。文献[9]在 RSC 电流内环中计及定子磁链暂态,实现了定转子电流解耦。RSC 与 GSC 电流可作为定子电流求解的条件,但现有文献对恒定电流控制的电流表达式的研究严重不足。

采用 FCL 实现 LVRT 中比较关心的问题有 FCL 阻抗值与 DFIG 控制参数的选取。基于 DFIG 与 FCL 整体建模求解得到的故障电流解析表达可定量表达这两者对故障电流的影响,可用于参数选择。

如果采用定子电压定向,投入 FCL 初期定子电压相角随着电流振荡变化幅度较大,使得 DFIG dq 轴与 xy 轴夹角不断变化。在电网 xy 轴下统一分析 DFIG 与 FCL 方程,此时 RSC 与 GSC dq 轴恒定电流在 xy 轴下为变化电流,不利于定子电流尽快稳定。

本文针对 DFIG 串联 FCL 实现 LVRT 中存在的问题,取消 RSC 与 GSC 功率外环,内环采用恒定电流控制,在 RSC 控制环节中计及定子磁链暂态,提出了 RSC、GSC 和 DFIG 故障电流的解析表达。该过程中将 DFIG dq 轴与电网 xy 轴重合,从而在 dq 轴与 xy 轴下皆实现恒电流控制。在不违背安全约束的前提下,比较故障过程中 DFIG 电磁转矩振荡,以选择 RSC 与 GSC 电流参考值、FCL 阻抗及切出时间等控制参数。比较解析模型与动态仿真结果,验证了所提控制策略的效果。

1 DFIG 机端串联 FCL 的故障电流解析表达

DFIG 机端串联桥型 FCL 如图 1 所示[10],其中用桨距角调节实现超速保护,用卸荷电路限制直流电压,用 FCL 提升机端电压,后两者目的不同。图中 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{I}$、$\boldsymbol{Z}$ 分别代表电压、电流与阻抗,下标 s、r、g、T 分别代表定子、转子、GSC 与出线变压器。正常工作时 IGBT 导通,FCL 的限流电感 L_{FCL} 和电阻 R_{FCL} 被旁路;故障时 IGBT 关断,从而投入限流阻抗。

按电动机惯例,同步旋转坐标系下 DFIG 磁链为:

收稿日期: 2017-01-23; **修回日期:** 2017-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277049)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277049)

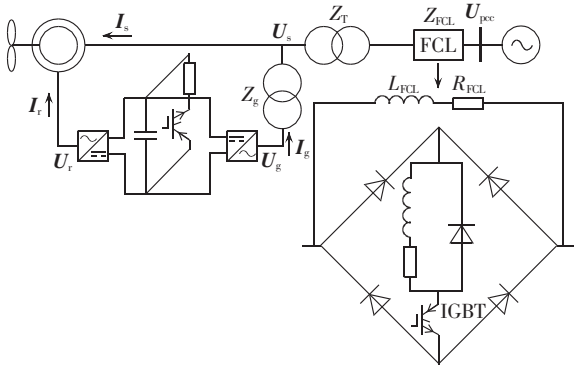


图 1　使用 FCL 的 DFIG LVRT

Fig.1　LVRT of DFIG with FCL

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}_s = R_s \boldsymbol{I}_s + \mathrm{j}\omega_s \boldsymbol{\psi}_s + \mathrm{p}\boldsymbol{\psi}_s \\ \boldsymbol{U}_r = R_r \boldsymbol{I}_r + \mathrm{j}s\omega_s \boldsymbol{\psi}_r + \mathrm{p}\boldsymbol{\psi}_r \\ \boldsymbol{\psi}_s = L_s \boldsymbol{I}_s + L_m \boldsymbol{I}_r \\ \boldsymbol{\psi}_r = L_r \boldsymbol{I}_r + L_m \boldsymbol{I}_s \end{cases} \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{\psi}$、L、R 分别为磁链、电感、电阻;ω_s 为同步转速;s 为转差率;p 为微分计算符。

引入 PCC 电压式(2),可得定子磁链的一阶微分方程式(3):

$$\boldsymbol{U}_{pcc} = \boldsymbol{U}_s + (\boldsymbol{I}_s - \boldsymbol{I}_g)[R_T + R_{FCL} + \mathrm{j}\omega_s(L_T + L_{FCL})] \tag{2}$$

$$\mathrm{p}\boldsymbol{\psi}_s + \left[\frac{R_s + R_T + R_{FCL} + \mathrm{j}\omega_s(L_T + L_{FCL})}{L_s} + \mathrm{j}\omega_s\right]\boldsymbol{\psi}_s = \boldsymbol{U}_{pcc} + \left(\boldsymbol{I}_g + \frac{L_m \boldsymbol{I}_r}{L_s}\right)[R_T + R_{FCL} + \mathrm{j}\omega_s(L_T + L_{FCL})] + \frac{L_m R_s}{L_s}\boldsymbol{I}_r \tag{3}$$

RSC 与 GSC 电流会影响定子磁链。功率外环控制在电压骤降的情况下会导致电流参考值剧烈增长,故在 LVRT 过程中取消 RSC 与 GSC 功率外环,改为恒定电流控制,基于此推导 RSC、GSC 与定子电流。

1.1　RSC 恒定电流控制

以恒定电流参考值 $\boldsymbol{I}_r^{ref}$ 代替 RSC 功率外环控制,基于 RSC 电压方程式(4)(其中 $L_r' = L_r - L_m^2/L_s$)与 RSC 控制方程式(5)求解转子电流。

$$\boldsymbol{U}_r = R_r \boldsymbol{I}_r + L_r' \mathrm{p}\boldsymbol{I}_r + \mathrm{j}s\omega_s(L_m \boldsymbol{I}_s + L_r \boldsymbol{I}_r) + \frac{L_m}{L_s}(\boldsymbol{U}_s - R_s \boldsymbol{I}_s - \mathrm{j}\omega_s \boldsymbol{\psi}_s) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{U}_r = K_{pr}(\boldsymbol{I}_r^{ref} - \boldsymbol{I}_r) + K_{ir}\int(\boldsymbol{I}_r^{ref} - \boldsymbol{I}_r)\mathrm{d}t + \mathrm{j}s\omega_s(L_m \boldsymbol{I}_s + L_r \boldsymbol{I}_r) \tag{5}$$

其中,K_{pr}、K_{ir} 分别为 RSC 电流控制的比例环节与积分环节系数;上标 ref 代表参考值。

联立方程求解时,定子磁链暂态(式(4)第二行)无法消去,电压跌落后定子磁链会振荡收敛至新的稳定值,其暂态不可忽略。在电流内环控制中引入定子磁链暂态,得到转子电压控制方程式(6)。控制框图如图 2 所示,其中下标 d、q 分别代表直轴、交轴分量。

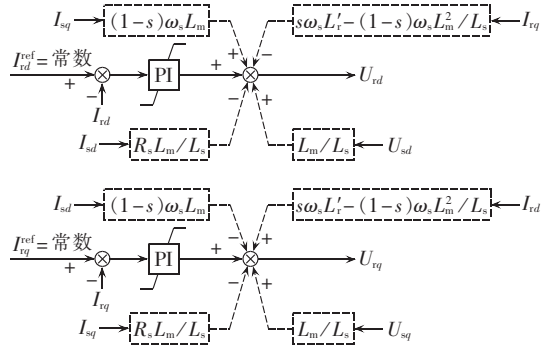


图 2　计及定子磁链暂态的 RSC 恒定电流控制

Fig.2　Constant current control of RSC considering stator flux transient

$$\boldsymbol{U}_r = K_{pr}(\boldsymbol{I}_r^{ref} - \boldsymbol{I}_r) + K_{ir}\int(\boldsymbol{I}_r^{ref} - \boldsymbol{I}_r)\mathrm{d}t + \mathrm{j}s\omega_s L_r' \boldsymbol{I}_r - \mathrm{j}\frac{L_m}{L_s}(1-s)\omega_s(L_s \boldsymbol{I}_s + L_m \boldsymbol{I}_r) + \frac{L_m}{L_s}(\boldsymbol{U}_s - R_s \boldsymbol{I}_s) \tag{6}$$

联立式(4)与式(6),可得转子电流的二阶微分方程表达式:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2 \boldsymbol{I}_r}{\mathrm{d}t^2} + m_1 \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_r}{\mathrm{d}t} + n_1 \boldsymbol{I}_r = n_1 \boldsymbol{I}_r^{ref} \\ m_1 = (R_r + K_{pr})\omega_s / L_r' \\ n_1 = K_{ir}\omega_s^2 / L_r' \end{cases} \tag{7}$$

求解式(7),可得转子电流表达式:

$$\boldsymbol{I}_r = \boldsymbol{I}_r^{ref} + \boldsymbol{c}_1 \mathrm{e}^{r_1 t} + \boldsymbol{c}_2 \mathrm{e}^{r_2 t} \tag{8}$$

$$\begin{cases} r_{1,2} = \dfrac{-m_1 \pm \sqrt{m_1^2 - 4n_1}}{2} \\ \boldsymbol{c}_1 = \dfrac{\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_{r0}}{\mathrm{d}t} - r_2(\boldsymbol{I}_{r0} - \boldsymbol{I}_r^{ref})}{r_1 - r_2} \\ \boldsymbol{c}_2 = \dfrac{\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_{r0}}{\mathrm{d}t} - r_1(\boldsymbol{I}_{r0} - \boldsymbol{I}_r^{ref})}{r_2 - r_1} \\ \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_{r0}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\omega_s K_{pr}(\boldsymbol{I}_r^{ref} - \boldsymbol{I}_{r0})}{L_r'} \end{cases} \tag{9}$$

其中,下标 0 代表电压跌落初始时刻值。

随着 PI 环节的比例与积分系数增大,r_1 与 r_2 减小,跟踪电流参考值的速度加快。若转子电流可在较短的时间内跟踪参考值,就可以在计算定子电流时将转子电流视作其参考值。

1.2　GSC 恒定电流控制

由 GSC 电压方程式(10)与 GSC 控制方程式(11)推导出 GSC 电流式(12)—(14),其中 K_{pg}、K_{ig} 分别为 GSC 电流控制比例与积分环节系数。

$$\boldsymbol{U}_g = R_g \boldsymbol{I}_g + L_g \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_g}{\mathrm{d}t} + \mathrm{j}\omega_s L_g \boldsymbol{I}_g + \boldsymbol{U}_s \tag{10}$$

$$\boldsymbol{U}_g = K_{pg}(\boldsymbol{I}_g^{ref} - \boldsymbol{I}_g) + K_{ig}\int(\boldsymbol{I}_g^{ref} - \boldsymbol{I}_g)\mathrm{d}t + \mathrm{j}\omega_s L_g \boldsymbol{I}_g + \boldsymbol{U}_s \tag{11}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2 \boldsymbol{I}_g}{\mathrm{d}t^2} + m_2 \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_g}{\mathrm{d}t} + n_2 \boldsymbol{I}_g = n_2 \boldsymbol{I}_g^{ref} \\ m_2 = (R_g + K_{pg})\omega_s / L_g \\ n_2 = K_{ig}\omega_s^2 / L_g \end{cases} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{ref}}+\boldsymbol{c}_3\mathrm{e}^{r_3t}+\boldsymbol{c}_4\mathrm{e}^{r_4t} \tag{13}$$

$$\begin{cases} r_{3,4}=\dfrac{-m_2\pm\sqrt{m_2^2-4n_2}}{2} \\ \boldsymbol{c}_3=\dfrac{\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_{\mathrm{g0}}}{\mathrm{d}t}-r_4(\boldsymbol{I}_{\mathrm{g0}}-\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{ref}})}{r_3-r_4} \\ \boldsymbol{c}_4=\dfrac{\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_{\mathrm{g0}}}{\mathrm{d}t}-r_3(\boldsymbol{I}_{\mathrm{g0}}-\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{ref}})}{r_4-r_3} \\ \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}_{\mathrm{g0}}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\omega_{\mathrm{s}}K_{\mathrm{pg}}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{ref}}-\boldsymbol{I}_{\mathrm{g0}})}{L_{\mathrm{g}}} \end{cases} \tag{14}$$

随着 PI 环节的比例与积分系数增大，r_3 与 r_4 减小，跟踪电流参考值的速度加快。若 GSC 电流可在较短的时间内跟踪参考值，就可以在计算定子电流时将 GSC 电流视作其参考值。

1.3 定子以及机端故障电流表达式

在 LVRT 的过程中，将 RSC 电流与 GSC 电流视为其参考值，进而求解式(3)，得到定子磁链、定子电流以及 DFIG 故障全电流：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}=\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}\infty}+(\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}\infty}-\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s0}})\mathrm{e}^{-\tau t} \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}=\dfrac{\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}-L_{\mathrm{m}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ref}}}{L_{\mathrm{s}}} \\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}+\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{ref}} \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s0}}=\dfrac{\boldsymbol{U}_{\mathrm{pcc0}}-R_{\mathrm{s}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{s0}}-(\boldsymbol{I}_{\mathrm{s0}}-\boldsymbol{I}_{\mathrm{g0}})(R_{\mathrm{T}}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{T}})}{\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}} \\ Z_{\mathrm{sum}}=R_{\mathrm{T}}+R_{\mathrm{FCL}}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}(L_{\mathrm{T}}+L_{\mathrm{FCL}}) \\ \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}\infty}=\dfrac{k\boldsymbol{U}_{\mathrm{pcc0}}+\left(\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{ref}}+\dfrac{L_{\mathrm{m}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ref}}}{L_{\mathrm{s}}}\right)Z_{\mathrm{sum}}+\dfrac{L_{\mathrm{m}}R_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{s}}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ref}}}{\dfrac{(R_{\mathrm{s}}+Z_{\mathrm{sum}})}{L_{\mathrm{s}}}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}} \\ \tau=\dfrac{R_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{T}}+R_{\mathrm{FCL}}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}(L_{\mathrm{T}}+L_{\mathrm{FCL}})}{L_{\mathrm{s}}}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}} \end{cases} \tag{16}$$

其中，k 为 PCC 电压的跌落比例；$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}\infty}$ 为电压跌落后定子磁链稳态值；τ 为衰减时间常数；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{f}}$ 为流入 PCC 的 DFIG 故障全电流；Z_{sum} 为出线变压器与 FCL 阻抗之和。

基于定子、RSC 与 GSC 电流表达式，由式(2)可求解定子电压；由式(4)可求解 RSC 电压；由式(10)可求解 GSC 电压。其中 RSC 电压与转速相关，可取故障前 DFIG 初始转速近似处理。

值得注意的是，式(3)应在同一坐标系下求解。DFIG 控制通常采用基于电压或磁链的 dq 轴定向控制，投入 FCL 初期定子电压与磁链相角随着电流振荡变化幅度较大，DFIG dq 轴与电网 xy 轴夹角不断变化，此时 dq 轴恒定电流分量在 xy 轴上为变化量。通过坐标变换将 dq 轴与 xy 轴重合(放弃电压/磁链定向)，既能确保故障电流解析表达的精度，也能够避免引起振荡。基于解析表达式同样可以通过设定 RSC 与 GSC 电流参考值调节 DFIG 输出功率。

2 采用 FCL 的 DFIG LVRT 控制参数选择

根据 PCC 电压与 FCL 投切状态将 DFIG LVRT 过程分为如下 3 个阶段，如图 3 所示。

a. 电压跌落(t_0—t_1)。此时 FCL 持续投入，DFIG RSC 与 GSC 采用恒定电流控制。

b. 电压恢复，FCL 投入(t_1—t_{cut})。此时，RSC 与GSC 电流参考值恢复为初始运行状态的参考值。为了抑制电压回升对 DFIG 运行状态造成的冲击，此时 FCL 仍投入。

c. 电压恢复，FCL 切出(t_{cut}—t_{end})。此时 DFIG 运行参数趋于稳定。该阶段结束后 DFIG 重新采用电压/磁链 dq 轴定向，恢复正常运行状态。

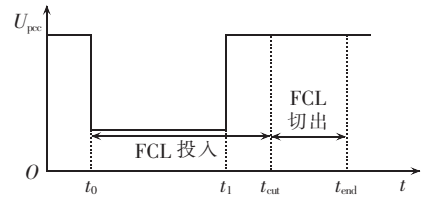


图 3 LVRT 过程中 FCL 控制策略

Fig.3 Control strategy of FCL during process of LVRT

DFIG LVRT 过程受 RSC 与 GSC 电流参考值、FCL 阻抗与切出时间的影响。确定上述参数时，可分别在各参数可行范围内等间距取值，利用电流解析表达对比不同取值组合的 LVRT 效果，从而确定控制参数。在此过程中，需满足转速约束、定子电流约束、RSC 与 GSC 的电压与电流约束等安全约束。

DFIG 电磁转矩的振荡在影响 DFIG 输出功率的同时，还会缩短传动轴寿命。故以电磁转矩振荡 ΔT_{e} 表征 DFIG LVRT 的效果：

$$\Delta T_{\mathrm{e}}=\int_{t_0}^{t_1}\left|T_{\mathrm{e}}-T_{\mathrm{e}}^{s_1}\right|\mathrm{d}t+\int_{t_1}^{t_{\mathrm{cut}}}\left|T_{\mathrm{e}}-T_{\mathrm{e}}^{s_2}\right|\mathrm{d}t+\int_{t_{\mathrm{cut}}}^{t_{\mathrm{end}}}\left|T_{\mathrm{e}}-T_{\mathrm{e}}^{s_3}\right|\mathrm{d}t \tag{17}$$

其中，上标 s_1、s_2、s_3 分别对应 LVRT 过程中 3 个阶段的电磁转矩稳态值。

3 算例分析

针对图 1 测试系统，取空气密度 $\rho=1.225\ \mathrm{kg/m^3}$，风机半径 $R=32.13$ m。C_{p} 函数参数：$c_1=0.73$，$c_2=121$，$c_3=0.58$，$c_4=0.002$，$c_5=2.14$，$c_6=13.2$，$c_7=18.4$，$c_8=-0.02$，$c_9=-0.003$[11]。DFIG 额定功率 1.5 MW，额定电压 690 V。$R_{\mathrm{s}}=0.007\,06$ p.u.，$L_{\mathrm{s}}=3.07$ p.u.，$R_{\mathrm{r}}=0.005$ p.u.，$L_{\mathrm{r}}=3.056$ p.u.，$L_{\mathrm{m}}=2.9$ p.u.，$R_{\mathrm{g}}=0.02$ p.u.，$L_{\mathrm{g}}=0.1$ p.u.，$R_{\mathrm{T}}=0.02$ p.u.，$L_{\mathrm{T}}=0.08$ p.u.，$K_{\mathrm{pr}}=1$，$K_{\mathrm{ir}}=0.1$，$K_{\mathrm{pg}}=1$，$K_{\mathrm{ig}}=0.1$。

3.1 RSC 控制方式效果对比

DFIG 机端串联 FCL，在相同控制目标下采用不同的 RSC 控制策略，控制效果如图 4 所示(图中纵轴均为标幺值，后同，图 4(b)中采用定子电压 d 轴定向与本文控制策略具有相同的转子电流波形)。

与不计定子磁链暂态结果相比，计及定子磁链暂

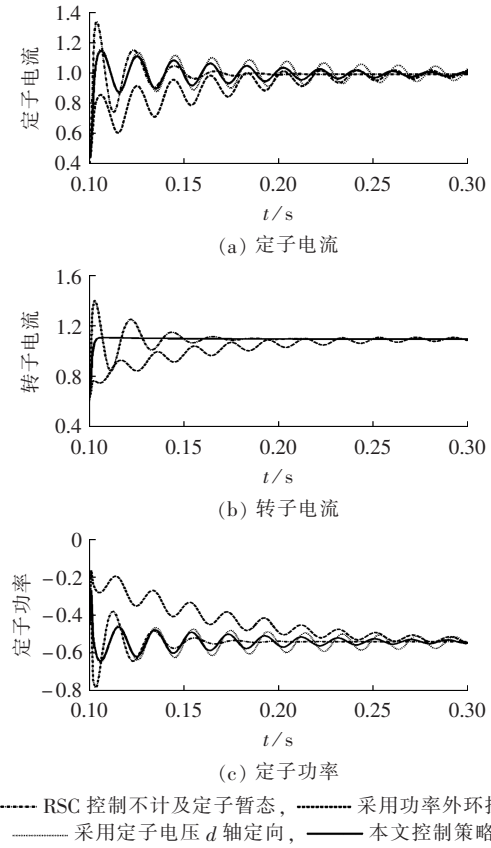


图 4 采用 FCL 时不同控制策略下 LVRT 效果

Fig.4 Effect of LVRT with FCL for different control strategies

态的 RSC 控制的冲击电流较小。与功率外环控制相比,取消了功率外环控制的功率追踪的速度更快,系统更容易趋于稳定;将 DFIG dq 轴与电网 xy 轴重合,相较定子电压 d 轴定向可以避免定子电压相角振荡对恒电流控制的影响,从而定子电流与功率的振荡较小。可见本文控制策略具有良好的 LVRT 效果。

3.2 FCL 动作后 DFIG 电流解析表达

若在 0.1~0.725 s 内 PCC 电压由 1 p.u. 跌落至 0.2 p.u.。在 xy 坐标系下 RSC 与 GSC 初始电流参考值分别为 0.49−j0.33 p.u. 与 0.10+j0.01 p.u.,在 LVRT 的过程中分别取 −0.3+j0.4 p.u. 与 0.3+j0.2 p.u.。FCL 的阻抗取 0.1+j0.2 p.u.,在 1 s 时 FCL 切出。由解析表达与动态仿真得到的 DFIG 定子电流、RSC 与 GSC 的电压/电流如图 5 所示。

在恒定电流控制下,RSC 与 GSC 可以迅速追踪电流参考值,满足本文解析模型的假设条件。定子电流、RSC 与 GSC 电流/电压的解析表达与动态仿真结果的对比验证了本文提出的解析表达模型的精度。且本文的解析模型在电压跌落 FCL 投入、电压恢复 FCL 投入与电压恢复 FCL 切出 3 个阶段中皆能保证足够的精度,从而可以用于分析 LVRT 全过程。

3.3 控制参数选择

取 RSC 与 GSC dq 轴参考电流范围为[−2,2] p.u.,

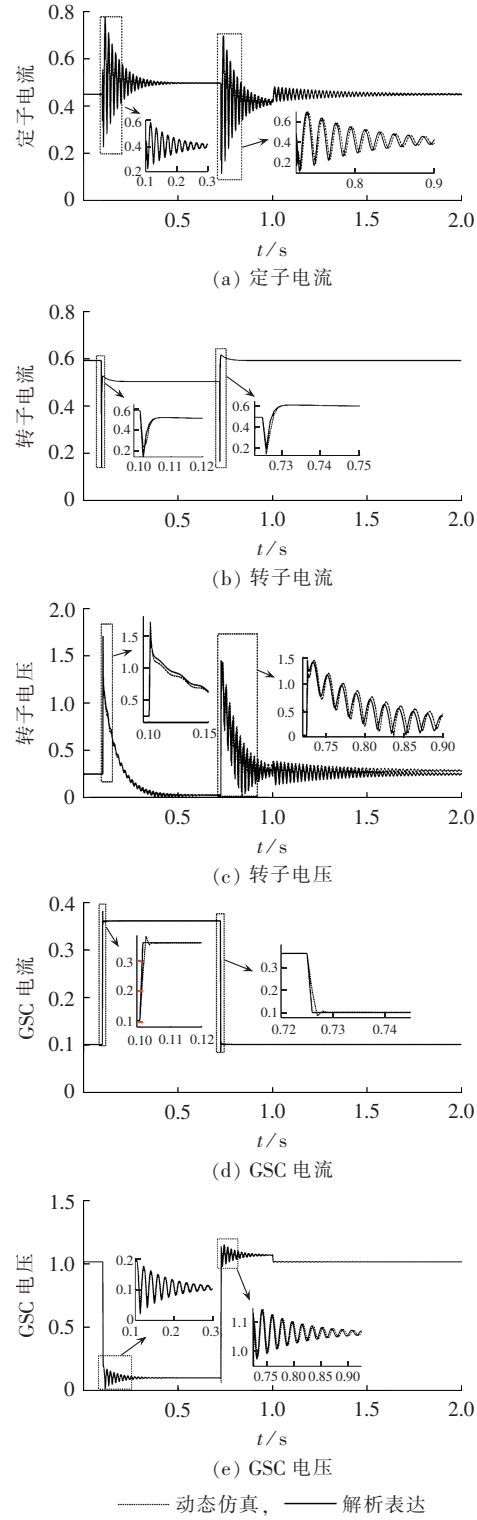
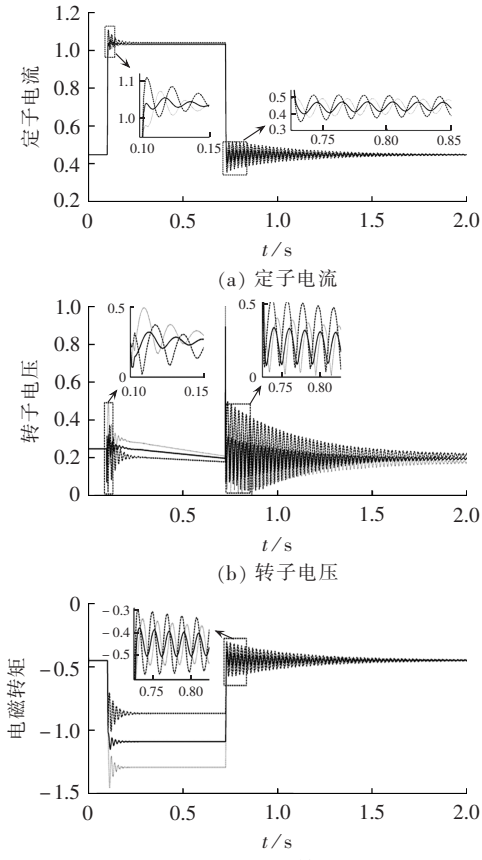


图 5 动态仿真与解析表达结果

Fig.5 Results of dynamic simulation and analytical calculation

FCL 电阻与电抗范围为[0,1.2] p.u.,按间距 0.05 p.u. 进行采样。取 FCL 切出时间范围为[1,1.2] s,按间距 0.01 s 进行采样。采用解析模型对比不同控制参数组合的 LVRT 效果。LVRT 过程中定子、RSC 与 GSC 电流需小于 2 p.u.[12],RSC 与 GSC 电压需小于 1.15 p.u.[13],DFIG 无功电流需满足 $I_q > 1.5(0.9-k)$[14]。

基于故障电流的解析表达,取 RSC 电流参考值为 1.1−j0.25 p.u.,GSC 电流参考值为 0.3−j1.2 p.u.,FCL 阻抗值为 0.35+j0.25 p.u.,并在电压恢复后立即切除 FCL,DFIG 的电磁转矩振荡最小。然后采用动态仿真验证所选取参数的控制效果,如图 6 与图 7 所示。结果表明,基于解析模型选取的控制参数,抑制定子电流、转子电压与电磁转矩振荡的效果更好一些。



(a) 定子电流

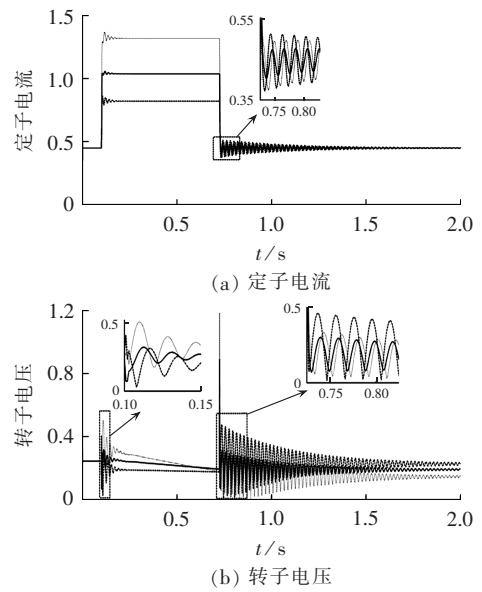
(b) 转子电压

(c) 电磁转矩

$Z_{FCL}=0.25+j0.15$ p.u., $Z_{FCL}=0.35+j0.25$ p.u.
$Z_{FCL}=0.45+j0.35$ p.u.

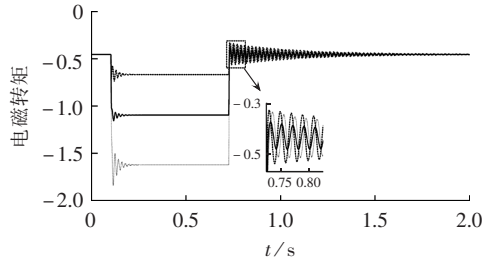
图 6 不同 FCL 阻抗值的 LVRT 效果

Fig.6 Effect of LVRT for different FCL impedances



(a) 定子电流

(b) 转子电压



(c) 电磁转矩

$I_r^{ref}=0.8+j0.05$ p.u., $I_r^{ref}=1.1-j0.25$ p.u.
$I_r^{ref}=1.4-j0.55$ p.u.

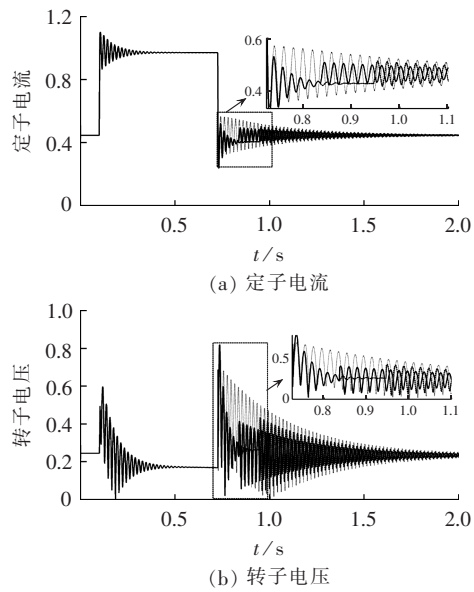
图 7 不同 RSC 电流参考值的 LVRT 效果

Fig.7 Effect of LVRT for different RSC current references

图 6 中当 FCL 阻抗大于所选取值时,定子电流与电磁转矩的振荡反而更剧烈,这与通常的认知相悖。原因在于,电磁振荡是由定子磁链振荡引起的,增大阻抗可增大直流磁链分量的衰减系数,促进振荡衰减。然而定子磁链稳态值受 RSC、GSC 电流参考值与 FCL 阻抗大小共同影响。由于优化取值下定子磁链初始值与稳态值相差(直流磁链)较小,在 FCL 阻抗较小的条件下产生的电磁转矩振荡仍然较小。

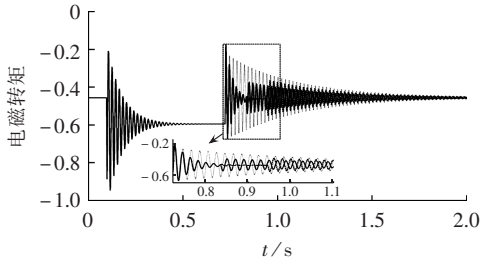
在电压恢复的过程中,DFIG 的暂态响应还受 FCL 切出时间的影响。若过早切出,电压回升产生的暂态电流振荡较为剧烈;若过晚切出,FCL 的切出会产生振荡,不利于 DFIG 尽快回归正常运行状态。其他条件不变,FCL 阻抗值取 0.1+j0.1 p.u.,选取 FCL 切出时间为 0.24 s。不同切出时间下 DFIG 的暂态响应如图 8 所示,所选切出时间更便于 DFIG 尽快地恢复正常运行。

对比图 6—8,可得 FCL 阻抗较大时对应的切出时间较短。主要原因是:较大阻抗值时 FCL 切出后



(a) 定子电流

(b) 转子电压



(c) 电磁转矩

$t_{cut}-t_1=0$, $t_{cut}-t_1=0.24$ s
$t_{cut}-t_1=0.5$ s

图 8 FCL 不同切除时间的的 LVRT 效果

Fig.8 Effect of LVRT for different tripping time of FCL

暂态过程较为剧烈,为了尽快恢复 DFIG 正常运行状态,需要尽早切出;LVRT 过程中较大阻抗值的 FCL 两端电压也较大,尽早切出还可以抵消电压回升的影响。

4　结论

基于 RSC 与 GSC 恒定电流控制策略,采用 FCL 实现 DFIG 故障穿越,本文提出了 DFIG 故障电流的解析表达以及 RSC 与 GSC 电流参考值、FCL 阻抗与切出时间等控制参数的选取方法,得到以下结论。

a. 故障后启动恒定电流控制时,由于考虑了定子磁链暂态,具有较小的冲击电流;放弃了功率外环控制,从而具有较快的跟踪速度;将 dq 轴与电网 xy 轴重合避免了定子电压相角振荡的影响,转子电流与功率振荡较小。

b. 较大的 FCL 阻抗将加速直流磁链衰减,而直流磁链大小受 FCL 阻抗和 RSC、GSC 电流参考值的影响,需综合考虑确定 FCL 阻值以抑制电磁转矩振荡。

c. 电压恢复阶段 DFIG 暂态过程受 FCL 切出时间影响。FCL 过早切出,电压回升会产生较大的冲击,FCL 过晚切出不利于 DFIG 尽快回归正常运行状态。FCL 阻抗值较大,LVRT 过程中电压较大,尽早切出可以抵消电压回升,使 DFIG 尽快回归正常运行。

参考文献:

[1] 李生虎,安锐,许志峰,等. 混合风电场中 PMSG 协助感应发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):21-27.
LI Shenghu,AN Rui,XU Zhifeng,et al. Coordinated LVRT of IG and PMSG in hybrid wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):21-27.

[2] 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.

[3] 郑涛,魏旭辉,李娟,等. PI 控制参数对双馈风电机组短路电流特性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):15-21.
ZHENG Tao,WEI Xuhui,LI Juan,et al. Influence of PI control parameters on short circuit current characteristics of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):15-21.

[4] 熊小伏,欧阳金鑫. 电网短路的双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28):114-121.
XIONG Xiaofu,OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(28):114-121.

[5] 张文娟,马浩淼,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.

[6] CHEN L,ZHENG F,DENG C,et al. Fault ride-through capability improvement of DFIG-based wind turbine by employing a voltage-compensation-type active SFCL[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering,2015,38(2):132-142.

[7] GAO W,WANG G,NING J. Development of low voltage ride-through control strategy for wind power generation using real time digital simulator[C]//Power Systems Conference and Exposition. Seattle,WA,USA:IEEE,2009:1-6.

[8] HOWARD D F,LIANG J,HARLEY R G. Short-circuit modeling of DFIGs with uninterrupted control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2014,2(1):47-57.

[9] HU J,HE Y. Dynamic modelling and robust current control of wind-turbine driven DFIG during external AC voltage dip[J]. Journal of Zhejiang University-Science A,2006,7(10):1757-1764.

[10] SADI M A H,ALI M H. A fuzzy logic controlled bridge type current limiter for transient stability augmentation of multi-machine power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(1):602-611.

[11] HEIER S. Grid integration of wind energy conversion systems[M]. Chichester,UK:Weily,1998:31-43.

[12] XIAO S,GENG H,ZHOU H,et al. Analysis of the control limit for rotor-side converter of doubly fed induction generator-based wind energy conversion system under various voltage dips[J] IET Renewable Power Generation,2013,7(1):71-81.

[13] LIU S,BI T,JIA K,et al. Coordinated fault-ride-through strategy for doubly-fed induction generators with enhanced reactive and active power support[J]. IET Renewable Power Generation,2016,10(2):203-211.

[14] 全国电力监管标准化技术委员会. 风电场接入电力系统技术规定:GB/T 19963—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

作者简介:

李生虎

李生虎(1974—),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术在电力系统中的应用(**E-mail**:shenghuli@hfut.edu.cn);

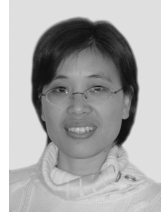
黄杰杰(1993—),男,江苏南通人,博士研究生,研究方向为风电系统分析与控制(**E-mail**:huangjiejie@mail.hfut.edu.cn);

吴正阳(1991—),男,安徽合肥人,博士研究生,研究方向为交直流系统可靠性建模与分析(**E-mail**:Zhengyang_Wu@mail.hfut.edu.cn)。

(下转第 21 页 continued on page 21)

Journal of Operational Research,2012,218(3):735-746.
[19] 孙元章,吴俊,李国杰,等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):41-47.
SUN Yuanzhang,WU Jun,LI Guojie,et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):41-47.

作者简介:


江岳文

江岳文(1977—),女,湖南岳阳人,副教授,博士,主要研究方向为风电并网优化运行、电力系统优化运行(**E-mail**:jiangyuewen2008@163.com);

张艺渊(1991—),男,福建漳浦人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场和电力系统优化运行(**E-mail**:122766802@qq.com)。

Peak regulation right trading between wind farm and thermal unit for second accommodation of wind power

JIANG Yuewen,ZHANG Yiyuan
(College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350116,China)

Abstract: The lack of system peak regulation capacity causes large-scale wind power curtailment at the load valley,which becomes one of the main reasons for limiting wind acceptance level. The peak regulation right trading can motivate the peak regulation potential of thermal units,which increases the second accommodation of wind power. The wind power is introduced into the peak regulation right trading model and the market mode of wind power participating in peak regulation right trading is proposed. The benefits of wind farms and costs of thermal units in the peak regulation right trading are analyzed,and a peak regulation right trading model is established,which takes maximum social benefit and maximum second acceptance capacity of wind power as its multi-objectives,and solved by MOPSO(Multi-Objective Particle Swarm Optimization) algorithm. Simulative results of IEEE 14-bus test system verify the effectiveness of the proposed model.

Key words: second accommodation of wind power; social benefit; peak regulation right trading between wind farm and thermal unit; MOPSO algorithm; wind power; models

(上接第 13 页 continued from page 13)

LVRT of DFIG with FCL based on analytical expression of fault current

LI Shenghu,HUANG Jiejie,WU Zhengyang
(School of Electrical Engineering and Automation,Hefei University of Technology,Hefei 230009,China)

Abstract: When FCL(Fault Current Limiter) is put in between DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) and PCC(Point of Common Coupling) to achieve the function of LVRT(Low Voltage Ride Through),the stator voltage cannot be set due to the influence of FCL impedance and GSC(Grid Side Converter) current,so a holistic model of DFIG and FCL is needed to analyze the fault current. The currents of RSC(Rotor Side Converter) and GSC are deduced based on constant current control strategy,and the analytical expression of DFIG fault current is proposed. Since the stator phase angle oscillation under voltage orientation will cause the constant currents of *d-q* reference frame change under *x-y* reference frame,which is unfavorable for the stabilization of stator current,the orientation scheme with coincidence of *d-q* reference frame and *x-y* reference frame is adopted. The electromagnetic torque oscillation in the process of DFIG LVRT is compared for different current references of RSC and GSC,FCL impedances and tripping time,and the control parameter set with better LVRT performance is selected. Simulative results show that the selection of FCL impedance is influenced by RSC and GSC current reference,and the selected tripping time becomes shorter along with the larger of FCL impedance.

Key words: DFIG; FCL; constant current control; analytical expression; selection of control parameter