

# 不平衡弱电网下构网型双馈风电机组转子侧变流器优化策略

徐 上<sup>1</sup>, 谢 震<sup>1</sup>, 杨曙昕<sup>2</sup>, 李梦杰<sup>1</sup>, 杨淑英<sup>1</sup>, 张 兴<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省合肥市 230009;

2. 国网安徽省电力有限公司培训中心, 安徽省合肥市 230011)

**摘要:** 双馈风电机组在不平衡电网下运行时,系统存在正、负序通路,而随着电网强度减弱,机网耦合加剧,不平衡定子电压的扰动将影响系统正常运行。为研究弱电网下双馈风电机组不平衡运行以及稳定机理,首先,构建了构网型双馈风电机组小信号状态空间模型,基于系统模型对正、负序转子电流控制进行稳定性及不平衡度分析。然后,提出基于自适应虚拟阻抗的优化控制策略,以实现弱电网下对不平衡定子电压、电流的协同补偿,通过理论分析证明了所提策略有效提高了不平衡弱电网下双馈风电机组的稳定性。最后,通过硬件在环实验平台,验证了所提优化策略的有效性。

**关键词:** 弱电网; 双馈风电机组; 不平衡电网; 构网型控制; 负序控制; 状态空间建模

## 0 引言

双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)作为风力发电主力机型,具有高效率、低成本的运行特点。而随着风电渗透率不断提高,电网强度逐渐减弱<sup>[1-3]</sup>,风电接入电网的并网点(point of common coupling, PCC)电压存在扰动,这对并网系统的稳定性造成了严重威胁<sup>[3]</sup>。

双馈风电机组当前应用最广泛的是跟网型(grid-following, GFL)控制,通过锁相环(phase-locked loop, PLL)获取控制角度,而在弱电网条件下,PLL将并网点电压波动通过输出角度引入控制电路,这将进一步影响系统稳定运行。构网型(grid-forming, GFM)控制通常采用下垂控制或虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制,根据功率环计算电网的相位信息,这使得双馈风电机组不再被动依赖电网频率,避免了弱电网下PLL失稳带来的不利影响,同时为电网提供了阻尼和惯量支撑,提高了并网系统的弱电网稳定性<sup>[4-6]</sup>。

双馈风电机组定子与电网直接相连,容易受到电网电压的影响,特别是弱电网时,线路阻抗较大,机网之间交互作用明显,电压稳定性较低。而当电网出现不平衡故障或者接入不平衡负载时,正、负序耦合通路使得机网交互更为复杂<sup>[7]</sup>,并网点电压将

出现负序扰动,进而感生出负序励磁电流,双馈风电机组将出现功率和转矩脉动,存在失稳和脱网风险<sup>[8]</sup>。

在强电网下并网点电压相对稳定,受不平衡工况影响相对较小,因而传统策略采用跟网型控制,并侧重于抑制电流的不平衡,文献[9]所提策略基于正、负序同步坐标系,利用比例控制器分别实现内环正序控制指令的跟随以及定子电流、有功功率等不平衡分量的抑制;文献[10]基于正序同步坐标系,通过比例谐振控制器对转子电流实现负序分量抑制。文献[11-14]针对不平衡转子电流、有功功率、无功功率以及转矩脉动等不同控制目标计算转子电流参考值。以上策略仅能针对单一目标进行抑制的问题,文献[15]提出不平衡电压下基于模型预测的多目标控制策略,通过调节权重系数,实现各控制目标的灵活抑制。

基于跟网型控制的不平衡抑制策略,在强电网下具有良好的电流抑制效果以及稳态性能。而随着电网强度不断减弱,跟网型控制中PLL的存在将对系统稳定性产生负面影响<sup>[16]</sup>,双馈风电机组具有失稳风险<sup>[17]</sup>,同时不平衡电网对并网点电压的影响愈发显著,双馈风电机组定子电压负序分量不可忽视。文献[18]基于虚拟同步控制分析了不平衡电网安全运行区域并抑制了有功功率脉动;文献[19-23]基于构网型控制,针对双馈风电机组在不平衡电网下存在的定、转子电流、转矩以及功率脉动等目标提

收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2024-09-26。

上网日期: 2024-12-05。

国家自然科学基金资助项目(52377177)。

出优化策略。国家标准中电能质量部分<sup>[24]</sup>定义“不平衡度”以表征三相电压不平衡程度,并规定电网正常运行时,并网点电压不平衡度不超过2%,短时不得超过4%。国家标准陆上风电并网导则<sup>[25]</sup>规定风电场要具有抑制负序电压升高的主动支撑能力,采取相应策略降低并网点电压不平衡度可以有效避免双馈风电机组并网系统进一步恶化电网。

由于未来电网面临短路比持续降低的趋势,传统的跟网型双馈风电机组针对电流的不平衡抑制策略不仅无法满足弱电网下负序电压的抑制需求,还使系统面临失稳风险,因此有必要对弱电网运行工况下的构网型双馈风电机组不平衡定子电压抑制策略进行探究。

本文以不平衡弱电网下的构网型双馈风电机组为研究对象。首先,探究了基于正、负序转子电流控制的不平衡抑制策略对定子电压、电流负序分量的限制情况,并通过构建其小信号状态空间模型分析系统弱电网稳定性;然后,提出基于自适应虚拟阻抗的不平衡定子电压、电流的协同补偿控制,分析不平衡抑制效果以及系统稳定性;最后,通过硬件在环实验平台验证了理论分析的正确性。

## 1 不平衡电网下双馈风电机组分析

图1为双馈风电机组并网系统拓扑图。图中:下标 $dq$ 表示对应变量的 $dq$ 坐标系下的分量;下标 $abc$ 表示对应变量的三相坐标系下的分量;下标 $ref$ 表示对应变量的参考值; $R_{grid}$ 、 $L_{grid}$ 分别为线路电阻、电感; $i_{grid}$ 为电网电流; $i_{rsc}$ 、 $i_{gsc}$ 分别为由电网馈入转子侧和网侧的电流; $u_s$ 、 $i_s$ 、 $u_r$ 、 $i_r$ 分别为定、转子电压和电流; $\theta_r$ 为电机转子角度; $\theta_g$ 为电网角度; $u_{dc}$ 为直流母线电压; $L_f$ 、 $C_f$ 、 $R_f$ 分别为滤波电感、电容以及寄生电阻; $i_c$ 为滤波电容电流; $u_g$ 、 $i_g$ 分别为网侧变流器输出电压和电流; $P_s$ 、 $Q_s$ 以及 $P_{sf}$ 、 $Q_{sf}$ 分别为定子有功、无功功率及其滤波值。电网简化为戴维南等效电路,由理想三相交流电压源以及等效阻抗构成。系统采用发电机惯例,网侧变流器经过滤波器连接到电网,转子侧变流器采用有功-虚拟同步、无功-下垂的功率同步方式,通过功率环获取同步角度 $\theta_s$ 和电压参考值 $u_{s,ref}$ 。双闭环控制包含定子电压外环和转子电流内环,电压环通过比例-积分(proportional-integral, PI)控制器实现对功率环所输出定子电压参考值的无静差控制,电流环则向系统提供转子电流控制能力。

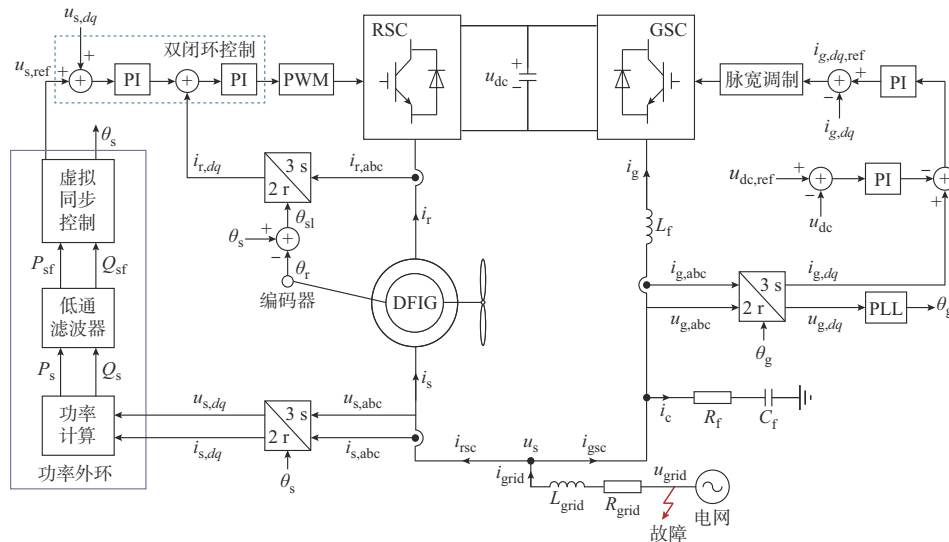


图1 双馈风电机组并网系统拓扑  
Fig. 1 Topology of grid connected system of doubly-fed wind turbine unit

当电网发生不平衡故障或者接入不平衡负载时,双馈风电机组定子电压出现负序分量,进而产生负序励磁电流,最终导致电机定转子电流出现负序分量。

### 1.1 不平衡系统矢量控制坐标系分析

根据对称分量法建立三相静止坐标系下不平衡系统正、负序分量关系如式(1)所示。

$$F_{abc} = F_{abc}^+ + F_{abc}^- \quad (1)$$

式中: $F$ 为电气矢量;上标+、-分别表示正、负序分量。

基于同步旋转坐标系的电气矢量应满足式(2)。

$$F_{dq,+} = F_{dq,+}^+ + F_{dq,+}^- = F_{dq,+}^+ + F_{dq,-}^- e^{-j2\omega_1 t} \quad (2)$$

式中: $\omega_1$ 为坐标系旋转角速度;下标+、-分别表示正、反向同步旋转坐标系。

由此可知,基于正、反向同步旋转坐标系的正、负序分量均表现为直流量,可以通过PI控制器对正、负序分量进行矢量控制;基于正向同步旋转坐标系控制系统下的负序分量表现为2倍工频谐波<sup>[9]</sup>,有必要采用谐振控制器取代传统控制器实现对负序分量的控制。单相电压跌落下的三相静止坐标系,正、反向旋转同步坐标系如附录A图A1所示。

由于不平衡系统控制电路中的负序分量表现形式不同,可以通过三相幅值来获取准确的负序不平衡度 $\varepsilon_2$ ,如式(3)所示,从而衡量电压或电流的不平衡程度,即负序分量比重<sup>[24]</sup>。

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L}}{1 + \sqrt{3 - 6L}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $L = (A^4 + B^4 + C^4)/(A^2 + B^2 + C^2)^2$ ,其中,A、B、C分别为三相电压或电流的幅值。

因此,基于正、反向以及正向同步旋转坐标系的控制系统,可以通过负序不平衡度量化电压、电流不平衡情况,有助于分析控制策略的负序分量抑制效果。

## 1.2 不平衡电网下构网型双馈风电机组建模

双馈风电机组并网特性主要由转子侧变流器决定,而网侧变流器容量、输出电流较小,因而本文为转子侧变流器为建模对象。

双馈风电机组并网系统采用LC滤波,以消除开关纹波。根据基尔霍夫定律,本文基于图1所示系统构建并网点电压和电流关系,如式(4)所示。

$$\begin{cases} u_{\text{grid}} - u_s = R_{\text{grid}} i_{\text{grid}} + L_{\text{grid}} \frac{d}{dt} i_{\text{grid}} \\ i_s = i_{\text{grid}} - C_f \frac{d}{dt} u_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: $u_{\text{grid}}$ 为电网电压。

由此可以建立正、反向同步旋转坐标系下并网点电网线路阻抗以及滤波电路的正、负序微分表达式,如式(5)和式(6)所示。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\text{grid},d,\pm} \\ i_{\text{grid},q,\pm} \end{bmatrix} = A_L^\pm \begin{bmatrix} i_{\text{grid},d,\pm} \\ i_{\text{grid},q,\pm} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{\text{grid}}} \begin{bmatrix} u_{\text{grid},d,\pm} \\ u_{\text{grid},q,\pm} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_{\text{grid}}} \begin{bmatrix} u_{s,d,\pm} \\ u_{s,q,\pm} \end{bmatrix} \\ A_L^\pm = \begin{bmatrix} -\frac{R_{\text{grid}}}{L_{\text{grid}}} & \mp \omega_s \\ \pm \omega_s & -\frac{R_{\text{grid}}}{L_{\text{grid}}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta u_{s,d,\pm} \\ \Delta u_{s,q,\pm} \end{bmatrix} = A_C^\pm \begin{bmatrix} \Delta u_{s,d,\pm} \\ \Delta u_{s,q,\pm} \end{bmatrix} + \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} \Delta i_{s,d,\pm} \\ \Delta i_{s,q,\pm} \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} \Delta i_{\text{grid},d,\pm} \\ \Delta i_{\text{grid},q,\pm} \end{bmatrix} \\ A_C^\pm = \begin{bmatrix} 0 & \pm \omega_s \\ \mp \omega_s & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

根据双馈异步电动机绕组耦合关系,正、反向同步旋转坐标系下定、转子电压的微分表达关系式为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s,d,\pm} \\ i_{s,q,\pm} \end{bmatrix} = A_{\text{DFIG},s}^\pm \begin{bmatrix} i_{s,d,\pm} \\ i_{s,q,\pm} \end{bmatrix} + B_{\text{DFIG},s,1}^\pm \begin{bmatrix} i_{r,d,\pm} \\ i_{r,q,\pm} \end{bmatrix} + B_{\text{DFIG},s,2}^\pm \begin{bmatrix} u_{sd,\pm} \\ u_{sq,\pm} \end{bmatrix} + B_{\text{DFIG},s,3}^\pm \begin{bmatrix} u_{rd,\pm} \\ u_{rq,\pm} \end{bmatrix} \\ A_{\text{DFIG},s}^\pm = \sigma \begin{bmatrix} -R_s L_r & \pm(\omega_s L_s L_r - \omega_{sl} L_m^2) \\ \pm(\omega_{sl} L_m^2 - \omega_s L_s L_r) & -R_s L_r \end{bmatrix} \\ B_{\text{DFIG},s,1}^\pm = \sigma \begin{bmatrix} R_r L_m & \pm(\omega_s - \omega_{sl}) L_m L_r \\ \pm(\omega_{sl} - \omega_s) L_m L_r & R_r L_m \end{bmatrix} \\ B_{\text{DFIG},s,2}^\pm = \sigma \begin{bmatrix} -L_r & 0 \\ 0 & -L_r \end{bmatrix} \\ B_{\text{DFIG},s,3}^\pm = \sigma \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{r,d,\pm} \\ i_{r,q,\pm} \end{bmatrix} = A_{\text{DFIG},r}^\pm \begin{bmatrix} i_{r,d,\pm} \\ i_{r,q,\pm} \end{bmatrix} + B_{\text{DFIG},r,1}^\pm \begin{bmatrix} i_{s,d,\pm} \\ i_{s,q,\pm} \end{bmatrix} + B_{\text{DFIG},r,2}^\pm \begin{bmatrix} u_{sd,\pm} \\ u_{sq,\pm} \end{bmatrix} + B_{\text{DFIG},r,3}^\pm \begin{bmatrix} u_{rd,\pm} \\ u_{rq,\pm} \end{bmatrix} \\ A_{\text{DFIG},r}^\pm = \sigma \begin{bmatrix} -R_s L_s & \pm(\omega_{sl} L_s L_r - \omega_s L_m^2) \\ \pm(\omega_s L_m^2 - \omega_{sl} L_s L_r) & -R_r L_s \end{bmatrix} \\ B_{\text{DFIG},r,1}^\pm = \sigma \begin{bmatrix} R_s L_m & \pm(\omega_{sl} - \omega_s) L_m L_s \\ \pm(\omega_s - \omega_{sl}) L_m L_s & R_s L_m \end{bmatrix} \\ B_{\text{DFIG},r,2}^\pm = \sigma \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \\ B_{\text{DFIG},r,3}^\pm = \sigma \begin{bmatrix} -L_s & 0 \\ 0 & -L_s \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\sigma = 1/(L_s L_r - L_m^2)$ ,其中, $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$ 分别为定子电感、转子电感、定转子互感; $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$ ,其中, $\omega_{sl}$ 、 $\omega_s$ 、 $\omega_r$ 分别为转差角速度、定子角速度以及转子角速度。

本文采用基于虚拟同步的构网型控制,由定子电压、电流计算得到瞬时功率,并经低通滤波器后输

入到VSG环节,功率外环结构如附录A图A2所示。

滤波器输出正、负序功率的线性表达式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{sf}^{\pm} \\ \Delta Q_{sf}^{\pm} \end{bmatrix} = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \begin{bmatrix} 1.5u_{s,d,0} & 1.5u_{s,q,0} \\ 1.5u_{s,q,0} & -1.5u_{s,d,0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{s,d,\pm}^{\pm} \\ \Delta i_{s,q,\pm}^{\pm} \end{bmatrix} + \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \begin{bmatrix} 1.5i_{s,d,0}^{\pm} & 1.5i_{s,q,0}^{\pm} \\ -1.5i_{s,q,0}^{\pm} & 1.5i_{s,d,0}^{\pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{s,d,\pm}^{\pm} \\ \Delta u_{s,q,\pm}^{\pm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\Delta(\cdot)$ 表示对应变量的在稳态工作点的变化量。

虚拟同步控制通过模拟同步发电机的转子运动方程,以实现电网的支撑,即

$$J\omega_0 \frac{d}{dt} \Delta\omega = -\Delta P_{sf} + \left( D + \frac{1}{m} \right) \Delta\omega \quad (10)$$

式中: $D$ 和 $J$ 分别为阻尼系数和转动惯量; $\omega_0$ 为额定电角速度; $\Delta\omega$ 为虚拟同步控制中角频率的变化量。

定子电压环和转子电流环的输出方程分别为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta i_{r,d,\text{ref}}^{\pm} \\ \Delta i_{r,q,\text{ref}}^{\pm} \end{bmatrix} = C_{u,1} \begin{bmatrix} \Delta u_{s,d,\pm}^{\pm} \\ \Delta u_{s,q,\pm}^{\pm} \end{bmatrix} + C_{u,2} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} + C_{u,3} \begin{bmatrix} \Delta P_{sf}^{\pm} \\ \Delta Q_{sf}^{\pm} \end{bmatrix} \\ C_{u,1} = \begin{bmatrix} 0 & -k_{up} \\ k_{up} & 0 \end{bmatrix} \\ C_{u,2} = \begin{bmatrix} k_{ui} & 0 \\ 0 & -k_{ui} \end{bmatrix} \\ C_{u,3} = \begin{bmatrix} 0 & -nk_{up} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \Delta x_1 = \int (\Delta u_{\text{ref}} - \Delta u_{s,q}) dt \\ \Delta x_2 = \int (0 - \Delta u_{s,d}) dt \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta u_{r,d,\pm}^{\pm} \\ \Delta u_{r,q,\pm}^{\pm} \end{bmatrix} = C_{i,1} \begin{bmatrix} \Delta i_{r,d,\pm}^{\pm} \\ \Delta i_{r,q,\pm}^{\pm} \end{bmatrix} + C_{i,2} \begin{bmatrix} \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \end{bmatrix} + C_{i,3} \begin{bmatrix} \Delta i_{r,d,\text{ref}}^{\pm} \\ \Delta i_{r,q,\text{ref}}^{\pm} \end{bmatrix} \\ C_{i,1} = \begin{bmatrix} -k_{ip} & 0 \\ 0 & -k_{ip} \end{bmatrix} \\ C_{i,2} = \begin{bmatrix} k_{ii} & 0 \\ 0 & k_{ii} \end{bmatrix} \\ C_{i,3} = \begin{bmatrix} k_{ip} & 0 \\ 0 & k_{ip} \end{bmatrix} \\ \Delta x_3 = \int (\Delta i_{r,d,\text{ref}} - \Delta i_{r,d}) dt \\ \Delta x_4 = \int (\Delta i_{r,q,\text{ref}} - \Delta i_{r,q}) dt \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k_{up}$ 、 $k_{ui}$ 、 $k_p$ 、 $k_{ii}$ 分别为定子电压、转子电流PI控制器的比例、微分系数; $n$ 为无功下垂系数。

## 2 基于正、负序控制的构网型双馈风电机组并网系统分析

双馈风电机组所采用的基于正向旋转坐标系的

矢量控制无法针对不平衡电网所导致的负序分量实现灵活控制,因此基于正、反同步旋转坐标系的正、负序控制得到了广泛应用。论文选取基于正、负序转子电流控制的双馈风电机组并网系统进行分析。

基于双同步坐标系的解耦软件锁相环(direct digital synthesizer with rotating frame-PLL, DDSRF-PLL)具有快速、准确分离正、负序分量的能力<sup>[26]</sup>。而在弱电网下,DDSRF-PLL因其内部PLL的存在仍会引入并网点电压扰动<sup>[27-28]</sup>,进而影响正、负序分解效果,现将虚拟同步控制输出的角度 $\theta_s$ ,作为序量分解中坐标变换的角度,构成基于功率同步的双同步坐标系解耦模块(power synchronized control-DDSRF, PSC-DDSRF),如附录A图A3所示。

由此避免了弱电网下由于PLL的存在导致引入电压扰动,并实现不平衡电网运行工况下双馈风电机组定、转子电压以及电流的序量分解,得到正、反向同步旋转坐标系下电压、电流的正、负序分量,利用PI控制器实现正、负序无静差控制。基于正、负序转子电流的构网型控制如图2所示。

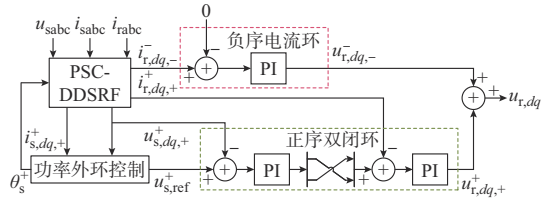


图2 正、负序电流控制结构图  
Fig. 2 Structure diagram of positive and negative sequence current control

由图2可知,正序转子电流控制机理是将PSC-DDSRF所提取的定子电压、电流正序分量进行功率计算,所得正序有功、无功功率作为虚拟同步控制的输入,进而获得正序控制角度 $\theta_s^+$ 以及电压环参考值 $u_{s,\text{ref}}^+$ 。正序定子电压分量作为电压环的反馈输入,以此构成正序定子电压、转子电流双内环控制结构;负序电流环通过PI控制实现负序转子电流对指令值的准确跟踪,达到有效抑制电流负序分量的控制目标。

### 2.1 不平衡度分析

针对双馈风电机组并网系统,本文在电网电压不平衡度为10%的运行工况下进行测试,绘制不同电网强度下基于正、负序的转子电流控制对定子电压和电流的不平衡度抑制效果,结果如附录A图A4所示。

附录A图A4(a)、(b)分别为电流、电压不平衡

度抑制情况,可以观察到,基于正、负序的转子电流控制可以抑制双馈风电机组定子电流不平衡度。在强电网条件下,并网点电压受电网故障影响较小,基于正、负序的电流控制可以在牺牲少量定子电压不平衡度的情况下,实现定子电流的几近平衡。但是,随着短路比不断降低,电流抑制效果逐渐减弱,电压不平衡度增幅加大。当系统运行于弱电网时,施加正、负序转子电流控制后的双馈风电机组定子电压不平衡度均大于4%。

因此,基于正、负序转子电流控制的抑制策略难以满足运行于弱电网下双馈风电机组定子电压不平衡度的要求,强电网下优良的定子电流负序分量的抑制效果随短路比下降也有所减弱。

## 2.2 基于正、负序控制的双馈风电机组稳定性分析

根据式(9)和式(10)可以得到正序功率外环控制小信号表达式为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta P_{sf}^+ \\ \Delta Q_{sf}^+ \end{bmatrix} = A_{PQ} \begin{bmatrix} \Delta P_{sf}^+ \\ \Delta Q_{sf}^+ \end{bmatrix} + B_{PQ,1} \begin{bmatrix} \Delta u_{s,d,+}^+ \\ \Delta u_{s,q,+}^+ \end{bmatrix} + \\ B_{PQ,2} \begin{bmatrix} \Delta i_{s,d,+}^+ \\ \Delta i_{s,q,+}^+ \end{bmatrix} \\ A_{PQ} = \begin{bmatrix} -\omega_f & 0 \\ 0 & -\omega_f \end{bmatrix} \\ B_{PQ,1} = \begin{bmatrix} 1.5\omega_f i_{s,d,0} & 1.5\omega_f i_{s,q,0} \\ -1.5\omega_f i_{s,q,0} & 1.5\omega_f i_{s,d,0} \end{bmatrix} \\ B_{PQ,2} = \begin{bmatrix} 1.5\omega_f u_{s,d,0} & 1.5\omega_f u_{s,q,0} \\ 1.5\omega_f u_{s,q,0} & -1.5\omega_f u_{s,d,0} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta \omega^+ = A_{VSG,\omega} \Delta \omega^+ + B_{VSG,\omega} \begin{bmatrix} \Delta P_{sf}^+ \\ \Delta Q_{sf}^+ \end{bmatrix} \\ A_{VSG,\omega} = -\frac{1+mD}{mJ\omega_0} \\ B_{VSG,\omega} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J\omega_0} & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{s,ref}^+ = C_{VSG,u} \begin{bmatrix} \Delta P_{sf}^+ \\ \Delta Q_{sf}^+ \end{bmatrix} \\ C_{VSG,u} = [0 \quad -n] \end{cases} \quad (15)$$

由式(11)和式(12)可以推导出电压和电流双闭环的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = B_{lu,1} \begin{bmatrix} \Delta u_{sd,+}^+ \\ \Delta u_{sq,+}^+ \end{bmatrix} + B_{lu,2} \begin{bmatrix} \Delta P_{sf}^+ \\ \Delta Q_{sf}^+ \end{bmatrix} \\ B_{lu,1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \\ B_{lu,2} = \begin{bmatrix} 0 & -n \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \end{bmatrix} = A_{li} \begin{bmatrix} \Delta x_3^+ \\ \Delta x_4^+ \end{bmatrix} + B_{li,1} \begin{bmatrix} \Delta u_{s,d,+}^+ \\ \Delta u_{s,q,+}^+ \end{bmatrix} + \\ B_{li,2} \begin{bmatrix} \Delta u_{r,d,+}^+ \\ \Delta u_{r,q,+}^+ \end{bmatrix} + B_{li,3} \begin{bmatrix} \Delta P_{sf}^+ \\ \Delta Q_{sf}^+ \end{bmatrix} \\ A_{li} = \begin{bmatrix} k_{wi} & 0 \\ 0 & -k_{wi} \end{bmatrix} \\ B_{li,1} = \begin{bmatrix} 0 & -k_{up} \\ k_{up} & 0 \end{bmatrix} \\ B_{li,2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \\ B_{li,3} = \begin{bmatrix} 0 & -nk_{up} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

负序电流控制中,负序转子电压的输出方程为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta u_{r,d,-}^- \\ \Delta u_{r,q,-}^- \end{bmatrix} = C_{n,1} \begin{bmatrix} \Delta i_{r,d,-}^- \\ \Delta i_{r,q,-}^- \end{bmatrix} + C_{n,2} \begin{bmatrix} \Delta x_5 \\ \Delta x_6 \end{bmatrix} \\ C_{n,1} = \begin{bmatrix} -k_{pn} & 0 \\ 0 & -k_{pn} \end{bmatrix} \\ C_{n,2} = \begin{bmatrix} k_{in} & 0 \\ 0 & k_{in} \end{bmatrix} \\ \Delta x_5 = \int (0 - \Delta i_{s,d,-}^-) dt \\ \Delta x_6 = \int (0 - \Delta i_{s,q,-}^-) dt \end{cases} \quad (18)$$

式中: $k_{pn}$ 、 $k_{in}$ 分别为负序控制中PI控制器的比例、微分系数。

根据双馈风电机组以及正、负序控制构建系统状态空间模型,并根据附录B表B1所示系统参数进行特征根分析。状态向量 $X_{pn}$ 选取原则如附录C式(C1)所示,通过改变电网短路比,绘制出系统根轨迹变化图,分析并网系统在不同电网强度下的稳定性。本文设置短路比由2减小至1,电网强度逐渐减弱,附录A图A5(a)为根轨迹变化,图A5(b)为局部放大图,可以观察到,零点附近的主导特征根极点是具有远离虚轴的趋势,达到临界值后又逐渐靠近虚轴并最终进入右半平面,根据稳定性判据,此时并网系统处于不稳定状态。由此可得,基于正、负序控制的构网型双馈风电机组在极弱电网下,依然存在失稳风险。

## 3 不平衡弱电网下的优化策略

根据第2章分析,基于正、负序的转子电流控制存在以下问题:强电网下具有良好的定子电流不平衡抑制能力,但当电网强度降低时,抑制能力随之减弱,而且将恶化定子电压质量;在弱电网下存在失稳风险,威胁并网系统稳定运行;为避免弱网下由PLL引入的谐波扰动<sup>[29]</sup>,正、负序控制所采用的

PSC-DDSRF,具有快速性、准确性以及抗干扰能力等优势的同时也引入了复杂的序量分解结构。

因此,为进一步提高构网型双馈风电机组在弱电网下的定子电压负序分量抑制能力以及闭环稳定性,并避免复杂的序量分解环节,本文提出针对不平衡定子电压以及定子电流的协同补偿控制,在正向同步旋转坐标系下利用虚拟阻抗控制改善系统稳定性,并实现对电压、电流不平衡度的协同抑制。

### 3.1 基于自适应虚拟阻抗的电压电流不平衡度协同补偿控制

根据图1所示双馈风电机组拓扑图可以绘制出系统阻抗简化模型,如附录A图A6所示。根据简化阻抗模型,由节点电压法可以推导出并网点电压表达式为:

$$u_{pcc} = \frac{u_{grid}}{Z_{grid} \left( \frac{1}{Z_{grid}} + \frac{1}{Z_{rsc}} + \frac{1}{Z_{gsc}} \right)} \quad (19)$$

由式(9)可知,电网电压  $u_{grid}$  以及线路阻抗  $Z_{grid}$  应视为固定值,通过改变转子侧或者网侧变流器等效阻抗可以改变并网点电压,从而可以实现对定子电压负序分量的控制。同样地,根据附录A图A6所示的并联结构可知,转子侧、网侧阻抗的变化也会影响电流分配,进而改变电网馈入双馈风电机组的定子侧电流。因此,可以通过调整输出阻抗实现并网点负序电压、电流的协同控制。

针对基于正、负序的转子电流控制在弱电网下恶化并网点电压不平衡度的问题,提出优化控制策略如图3所示。图中:下标 com表示基于谐振控制器的补偿分量; $Z_v$ 为虚拟阻抗; $K_u$ 、 $K_i$ 分别为电压、电流协同系数,用以分配电压和电流不平衡度的抑制权重。由于谐振控制器的不平衡分量在正序两相旋转坐标系下表现为二倍基频信号,故通过谐振控制器将协同控制电压  $u_{s,v}$  中的谐波分量进行提取,进而通过PI控制器对负序分量进行抑制。

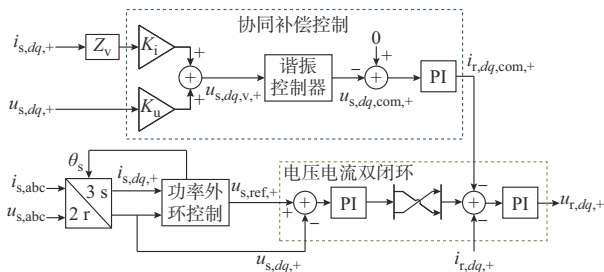


图3 不平衡电压、电流协同补偿控制结构图

Fig.3 Structure diagram of unbalanced voltage and current coordinated compensation control

谐振控制器通过引入截止频率  $\omega_c$  以防止电网频率扰动,其传递函数  $G_R(s)$  如式(20)所示。

$$\begin{cases} u_{s,dq,com,+} = G_R(s) u_{s,dq,v,+} \\ G_R(s) = \frac{2k_c \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_2^2} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $k_c$ 为谐振增益系数; $\omega_2$ 为谐振频率。

由此可以得到经虚拟阻抗和谐振控制器所提取的负序分量的输出表达式如式(21)所示,并针对电压、电流协同系数设置边界条件如式(22)所示,以实现协同补偿的灵活控制。

$$u_{s,dq,com,+} = (K_u u_{s,dq,+} + K_i i_{s,dq,+}) G_R(s) \quad (21)$$

$$K_u + K_i = 1 \quad (22)$$

考虑到弱电网条件下机网耦合加剧,并网点电压更容易受到电网不平衡工况影响,因此,并网系统对电压不平衡度应具有更高的要求,但同时应避免电流过度恶化,故本文采用自适应虚拟阻抗控制,针对不同电网强度以及电网电压不平衡度,实现协同系数自适应选取,以保障并网系统实现对电压电流不平衡度的灵活、快速抑制。

当双馈电机处于轻载状态时,输出功率较低甚至为零,此时电机具有足够的功率容量,可以设置  $K_u=1$ ,即可将协同抑制裕度全部给到电压不平衡度抑制;当输出功率较大甚至为满载运行时,正序定子电流幅值较大,若此时电压协同系数  $K_u$  较大,可能会导致负序定子电流过大,具有过流风险<sup>[30]</sup>。因此将协同权重完全给到定子电流抑制,无静差控制原理如附录A图A7所示。

对于具有足够功率冗余的双馈风电机组,在不平衡弱电网运行工况下,对电压不平衡度应具有更高要求。因此,策略通过设置不平衡度自适应环节,并通过PI控制器实现对电压电流不平衡度无静差跟随,自适应控制流程如图4所示。弱电网下,在优先保障电压不平衡度满足电网导则的前提下,分配剩余权重,从而对定子电流不平衡度进行抑制;在较强不平衡电网下,并网点电压具有较强的抗干扰能力,故设置为电流不平衡度跟随模式。

针对不同电网电压不平衡度,策略通过分级设置不平衡度指令值,以实现协同控制权重的最优分配。在基于自适应虚拟阻抗的不平衡度抑制过程中,设置不平衡度指令值  $\epsilon_{ref} = 4\%$ ,以满足并网点电压不平衡度的短时要求,同时检测电流不平衡度,若其也小于4%,修正电压不平衡度指令值为2%以满

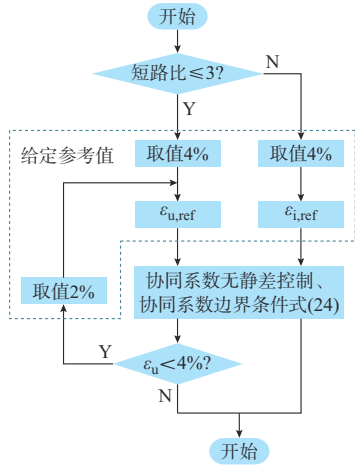


图 4 自适应虚拟阻抗控制流程图

Fig. 4 Flowchart of adaptive virtual impedance control

足电网正常运行下电压要求。

### 3.2 优化控制不平衡度分析

基于不平衡定子电压、电流协同补偿控制构建的 2 MW 双馈风电机组测试系统,在电网电压不平衡度达 10% 的弱电网环境中开展抑制效果实验,实验结果如附录 A 图 A8 所示。

由此可知,在较强不平衡电网下,不平衡电压、电流协同补偿控制策略通过调整协同系数,可以实现对定子电流负序分量的有效抑制,具备正、负序控制在强电网下的应对不平衡电流的性能优势;在不平衡弱电网下,协同补偿控制可以有效抑制并网点电压不平衡度,同时可以缓解电流不平衡度的恶化。基于自适应虚拟阻抗的电压电流不平衡度协同补偿控制具有在强/弱电网下兼顾并网点电压、电流负序分量的抑制能力,使运行在不平衡工况下的双馈风电机组可以为并网点提供电压以及电流不平衡度协同支撑,以满足电网导则对不平衡度的要求。

### 3.3 优化控制稳定性分析

基于不平衡定子电压、电流的协同补偿控制由自适应虚拟阻抗、谐振控制器以及 PI 控制器构成。经虚拟阻抗以及协同系数获取的虚拟输出电压小信号表达式为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_{s,d,v,+} \\ u_{s,q,v,+} \end{bmatrix} = C_{Z,1} \begin{bmatrix} i_{s,d,+} \\ i_{s,q,+} \end{bmatrix} + C_{Z,2} \begin{bmatrix} u_{s,d,+} \\ u_{s,q,+} \end{bmatrix} \\ C_{Z,1} = Z_v \begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & K_i \end{bmatrix} \\ C_{Z,2} = \begin{bmatrix} K_u & 0 \\ 0 & K_u \end{bmatrix} \end{cases} \quad (23)$$

谐振控制器的状态空间方程以及输出方程为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{R_1,d,+} \\ x_{R_2,d,+} \\ x_{R_1,q,+} \\ x_{R_2,q,+} \end{bmatrix} = A_R \begin{bmatrix} x_{R_1,d,+} \\ x_{R_2,d,+} \\ x_{R_1,q,+} \\ x_{R_2,q,+} \end{bmatrix} + B_R C_{Z,1} \begin{bmatrix} i_{s,d,+} \\ i_{s,q,+} \end{bmatrix} + B_R C_{Z,2} \begin{bmatrix} u_{s,d,+} \\ u_{s,q,+} \end{bmatrix} \\ A_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\omega_2^2 & -2\omega_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_2^2 & -2\omega_c \end{bmatrix} \\ B_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_{s,d,+} \\ u_{s,q,+} \end{bmatrix} = C_R \begin{bmatrix} x_{R_1,d,+} \\ x_{R_2,d,+} \\ x_{R_1,q,+} \\ x_{R_2,q,+} \end{bmatrix} \\ C_R = \begin{bmatrix} 0 & 2k_r \omega_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_r \omega_c \end{bmatrix} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $x_{R_1,d,+}$ 、 $x_{R_2,d,+}$ 、 $x_{R_1,q,+}$ 、 $x_{R_2,q,+}$  为准谐振控制器的过程状态变量。

控制中 PI 控制器状态方程和输出方程为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta x_{5,+} \\ \Delta x_{6,+} \end{bmatrix} = A_{\text{com,PI}} \begin{bmatrix} \Delta x_{5,+} \\ \Delta x_{6,+} \end{bmatrix} + B_{\text{com,PI}} \begin{bmatrix} x_{R_1,d,+} \\ x_{R_2,d,+} \\ x_{R_1,q,+} \\ x_{R_2,q,+} \end{bmatrix} \\ A_{\text{com,PI}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B_{\text{com,PI}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta u_{r,d,\text{com}+} \\ \Delta u_{r,q,\text{com}+} \end{bmatrix} = C_{\text{com,PI},1} \begin{bmatrix} \Delta u_{s,d,+} \\ \Delta u_{s,q,+} \end{bmatrix} + C_{\text{com,PI},2} C_R \begin{bmatrix} \Delta x_{5,+} \\ \Delta x_{6,+} \end{bmatrix} \\ C_{\text{com,PI},1} = \begin{bmatrix} -K_{pr} & 0 \\ 0 & -K_{pr} \end{bmatrix} \\ C_{\text{com,PI},2} = \begin{bmatrix} K_{ir} & 0 \\ 0 & K_{ir} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (27)$$

构建基于不平衡定子电压、电流协同补偿控制的双馈风电机组小信号状态空间模型,状态变量选取如附录 C 式 (C2) 所示。正、负序状态向量满足如式 (29) 所示的约束。

$$\dot{X}_{\text{col},+}^{\pm} = A_{\text{col},+}^{\pm} X_{\text{col},+}^{\pm} \quad (28)$$

式中:  $A_{\text{col},+}^{\pm}$  为协同补偿控制模型系统矩阵。

根据式(2)可知,基于正向旋转坐标系的负序状态向量  $X_{\text{col},+}^-$  表现为 100 Hz 的交流量,且与基于反向同步坐标系的负序分量  $X_{\text{col},-}^-$  存在如式(29)所示的变换。

$$\dot{X}_{\text{col},-}^- = X_{\text{col},+}^- e^{-j2\omega_1 t} \quad (29)$$

结合式(28)可以得到:

$$\dot{X}_{\text{col},-}^- e^{-j2\omega_1 t} = (A_{\text{col}}^- X_{\text{col},-}^-) e^{-j2\omega_1 t} \quad (30)$$

由此可以获得等价微分表达式为:

$$\dot{X}_{\text{col},-}^- = (A_{\text{col}}^- - 2j\omega E) X_{\text{col},-}^- \quad (31)$$

式中:  $E$  为单位矩阵。

负序分量由交流量转换为基于反向旋转坐标系下的直流量,基于正、负序的状态空间模型应满足  $X_{\text{col},\pm}^\pm = [X_{\text{col},+}^+, X_{\text{col},-}^-]^T$ 。由此绘制出所提小信号模型在短路比变化下的特征根轨迹,如附录 A 图 A9 所示。可以观察到,随着电网强度逐渐减弱,主导极点逐渐靠近虚轴,但仍位于左半平面,故基于自适应虚拟阻抗的电压电流不平衡度协同补偿控制系统在不平衡弱电网运行下始终处于稳定状态。对比 2.2 节基于正、负序控制的并网系统,在相同电网强度变化下,优化控制在弱电网下稳定性得到提高。

考虑协同补偿系数对系统稳定性的影响,选取  $K_u$  从 1 减小到 0,据此绘制根轨迹,如附录 A 图 A10 所示。由此可知,随着协同补偿系数  $K_u$  增大,系统稳定性逐渐减弱。这是因为  $K_u$  与虚拟阻抗控制的参与程度成反比。因此,在确保定子电压负序分量抑制基本有效的前提下,应将补偿冗余分配给定子电流负序分量的抑制以及系统稳定性的保障工作,这与基于自适应虚拟阻抗的电压电流不平衡度协同补偿控制策略的设计分析结果一致。

#### 4 硬件在环实验验证

为进一步验证弱电网下的不平衡优化控制策略及其理论分析,本文所搭建的双馈风电机组硬件在环实验平台如附录 A 图 A11 所示,平台由 RT-Box、2 MW 机组硬件控制箱以及上位机构成,利用示波器进行观测。电机及电网参数如附录 B 表 B1 所示。

附录 A 图 A12 展示了在电网电压不平衡度为 10% 的运行工况下,短路比为 6 的较强电网以及短路比为 2 的较弱电网中,施加正、负序转子电流控制前后,双馈风电机组对应的定子电流、电压波形。由附录 A 图 A12(a)可知,经正、负序控制的双馈风电机组定子电流不平衡情况得到了极大抑制,电流不平衡度在施加策略后由 11.9% 降低至 1.1%,验证了在较强电网下,定子电压受电网故障影响较小,故在

强电网下施加正、负序转子电流控制具有较好的不平衡抑制效果;由附录 A 图 A12(b)可知,正、负序控制在弱电网下仍具有定子电流负序分量抑制能力。然而,该控制策略会使定子电压的不平衡情况急剧恶化。

在短路比为 2 的弱电网条件下,对基于协同补偿控制的双馈风电机组开展协同系数测试实验,所得结果如图 5 所示。可以看出,在弱电网环境中,协同补偿控制能够有效抑制定子电压的负序分量。通过合理选取协同系数,能够实现对电压电流不平衡度的协同补偿控制,提升双馈风电机组在弱电网下的运行稳定性与电能质量。

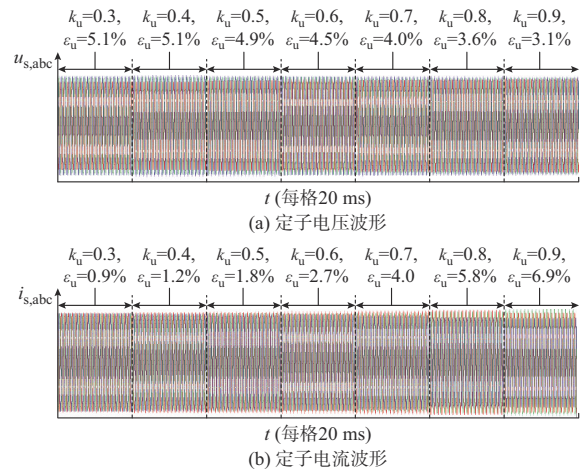


图 5 协同系数对不平衡抑制影响  
Fig. 5 Effect of synergy coefficient on unbalanced suppression

图 6 展示了基于虚拟阻抗的协同补偿控制在不同电网强度和电网电压不平衡度的情形下,能够实现协同系数的自适应选取。通过这种自适应调节机制,可确保在各类不平衡故障以及不同运行工况下,均能满足国家标准的相关要求,有效提升了系统应对复杂电网条件的能力。为验证基于自适应虚拟阻抗的不平衡度协同补偿控制效果,在不同电网强度下开展实验,分别选取短路比为 6、4、2 的电网,并设定电压不平衡度为 8%。通过观测定子电压、电流不平衡度发现:该协同补偿控制能够满足不平衡故障时国家标准的短时要求,同时有效避免电流不平衡度过度恶化。在短路比为 2 的弱电网环境中,基于优化策略的双馈风电机组可实现不平衡度权重的最优分配。当电网电压不平衡度处于 8% 的运行工况时,能满足国家标准的短时要求;在不平衡度为 6% 和 4% 的运行工况下,满足电网对风机正常运行时并网点电压不平衡度的要求,确保风机稳定运行,保障电能质量。



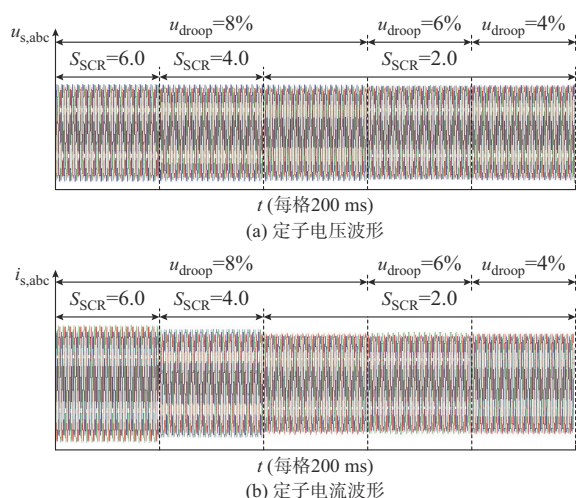


图6 自适应阻尼控制效果  
Fig. 6 Effect of adaptive damping control

附录A图A13为不平衡弱电网下,正、负序控制以及协同补偿控制对功率脉动的影响。可以看到,所提优化策略不会恶化有功功率脉动,当选取合适协同系数时可以对无功功率脉动提供抑制。

## 5 结语

本文以基于虚拟同步控制的构网型双馈风电机组为研究对象,分析了正、负序转子电流控制的不平衡度抑制效果,并建立小信号状态空间模型,探究弱电网下系统的稳定性;提出弱电网下不平衡度优化抑制策略,结论如下:

1)基于正、负序的转子电流控制,在强电网下对不平衡定子电流具有良好的抑制效果,同时电压不平衡度变化较小;随着电网强度不断降低,不平衡定子电压恶化加剧。

2)优化控制策略通过自适应虚拟阻抗对电压、电流不平衡度实现协同补偿控制,可以适应不同短路比以及电网电压不平衡度,满足国家标准对并网点电压不平衡度的限值要求。在不平衡弱电网下实现对不平衡电压的抑制,同时不会恶化电流不平衡度以及功率脉动。

3)通过状态空间建模,对弱电网下双馈风电机组进行稳定性分析可以得出,基于正、负序控制的双馈风电机组在较弱电网下仍存在失稳风险;而通过自适应虚拟阻抗控制的优化策略可以保证弱电网下系统的稳定运行,并且可以通过自适应环节实现不平衡度和稳定性的最优控制。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] 刘其辉,闫佳颖,吴勇,等. 计及锁相误差的双馈风电并网系统暂态过电压特性与抑制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 165-173.  
LIU Qihui, YAN Jiaying, WU Yong, et al. Characteristics and suppression of transient overvoltage for DFIG wind power grid-connected system considering phase locking error[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 165-173.
- [2] GUO X, ZHU D H, ZOU X D, et al. Analysis and enhancement of active power transfer capability for DFIG-based WTs in very weak grid [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 3895-3906.
- [3] LIU P Y, XIE X R, SHAIR J. Adaptive hybrid grid-forming and grid-following control of IBRs with enhanced small-signal stability under varying SCRs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 6603-6607.
- [4] XU H L, WU H, LI Z, et al. Gershgorin-circle based low-complexity generalized nyquist stability criterion for DFIG driven wind turbines [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2022, 12(1): 29-40.
- [5] 李辉,王坤,胡玉,等. 双馈风电系统虚拟同步控制的阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3434-3443.  
LI Hui, WANG Kun, HU Yu, et al. Impedance modeling and stability analysis of virtual synchronous control based on doubly-fed wind generation systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3434-3443.
- [6] 马子涵,黄萌,付熙坤,等. 构网型电源接入下新能源场站的弱电网运行能力评估[J/OL]. 电力系统自动化[2024-01-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240605.1022.004.html>.  
MA Zihan, HUANG Meng, FU Xikun, et al. Operation capacity evaluation of weak-grid for renewable energy station with grid-forming sources[J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2024-01-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240605.1022.004.html>.
- [7] 吴瀚,徐海亮,张利,等. 弱电网下含负序控制的双馈风机阻抗建模及关键致稳因素评估[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2516-2528.  
WU Han, XU Hailiang, ZHANG Li, et al. Impedance modeling and key stabilizing factor evaluation of DFIG-based wind turbines with negative sequence control during weak power grid[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2516-2528.
- [8] ZHOU Y N, ZHU D H, HU J B, et al. Magnitude-phase characteristics analysis of inertia for DFIG-based wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10): 12336-12348.
- [9] 赵阳,邹旭东,丁稳房. 不平衡电网电压下并网型双馈感应发电机励磁控制策略[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(1): 110-113.  
ZHAO Yang, ZOU Xudong, DING Wenfang. Excitation control strategy of grid-connecting DFIG under unbalanced grid voltage [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(1): 110-113.
- [10] 付敏,刘乐,王彦美,等. 不平衡电压下双馈风力发电机转子侧PIR控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 128-133.

- FU Min, LIU Le, WANG Yanmei, et al. PIR control for doubly-fed wind power system of rotor side under unbalanced grid voltage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 128-133.
- [11] 王一翔, 孙士涛, 程鹏, 等. 不平衡电压条件下双馈感应发电机混合直接功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 199-205.
- WANG Yixiang, SUN Shitao, CHENG Peng, et al. Hybrid direct power control strategy of doubly-fed induction generator under unbalanced voltage conditions [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 199-205.
- [12] 年珩, 程鹏. 电网电压不平衡时 PWM 整流器的谐振直接功率控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 86-94.
- NIAN Heng, CHENG Peng. Resonant based direct power control strategy for PWM rectifier under unbalanced grid voltage condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 86-94.
- [13] 万子镜, 田震, 王伟, 等. 基于平滑切换的不平衡工况下直驱风机故障穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 138-146.
- WAN Zijing, TIAN Zhen, WANG Wei, et al. Smooth switching based fault ride-through control strategy for direct-driven wind turbine under unbalance condition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 138-146.
- [14] 程启明, 郭凯, 程尹曼, 等. 电压不平衡下双馈感应发电机机侧变换器无源控制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 73-81.
- CHENG Qiming, GUO Kai, CHENG Yinman, et al. Passivity-based control method for rotor-side converter of doubly-fed induction generator under unbalanced voltage condition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 73-81.
- [15] 谢震, 牛立凡, 张兴, 等. 不平衡电网电压下双馈发电机多目标模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3917-3930.
- XIE Zhen, NIU Lifan, ZHANG Xing, et al. Multi-objective model predictive control of double-fed induction generator under unbalanced grid voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3917-3930.
- [16] TU C M, GAO J Y, XIAO F, et al. Stability analysis of the grid-connected inverter considering the asymmetric positive-feedback loops introduced by the PLL in weak grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 5793-5802.
- [17] 刘辉, 陈璨, 巨云涛, 等. 风电汇集地区电压不平衡特性分析及抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 132-139.
- LIU Hui, CHEN Can, JU Yuntao, et al. Characteristics analysis and suppression strategy of voltage unbalance in areas with integration of wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 132-139.
- [18] 熊浩, 杜雄, 孙鹏菊, 等. 三相并网变流器在电网不对称故障时的有功功率安全运行区域[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6110-6118.
- XIONG Hao, DU Xiong, SUN Pengju, et al. Active power safe operation region of three-phase grid-connected voltage source converter under unbalanced grid faults [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6110-6118.
- [19] BAECKELAND N, VENKATRAMANAN D, KLEEMANN M, et al. Stationary-frame grid-forming inverter control architectures for unbalanced fault-current limiting [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2813-2825.
- [20] 王仰铭, 孙丹, 年珩, 等. 不平衡电网下自同步虚拟同步机拓展功率控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3368-3375.
- WANG Yangming, SUN Dan, NIAN Heng, et al. Extended power control strategy of self-synchronized virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3368-3375.
- [21] 韦微, 姬秋华, 王伟, 等. 适用于电网不对称下的自同步电压源逆变器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 124-131.
- WEI Zheng, JI Qiuhua, WANG Wei, et al. Control strategy of self-synchronous voltage source inverter for asymmetric power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 124-131.
- [22] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4274-4285.
- PAN Zixun, YANG Xiaofeng, ZHAO Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274-4285.
- [23] 程雪坤, 孙旭东, 柴建云, 等. 适用于电网不对称故障的双馈风力发电机虚拟同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 120-126.
- CHENG Xuekun, SUN Xudong, CHAI Jianyun, et al. Virtual synchronous control strategy for doubly-fed induction generator under asymmetrical grid faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 120-126.
- [24] 电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008 [s]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- Power quality—three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008 [s]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [25] 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021 [s]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- Technical specification for connecting wind farm to power system—Part 1: On shore wind power: GB/T 19963.1—2021 [s]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.
- [26] ACHLERKAR P D, PANIGRAHI B K. New perspectives on stability of decoupled double synchronous reference frame PLL [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 285-302.
- [27] WANG Z, GUO L, LI X L, et al. PLL synchronization transient stability analysis of a weak-grid connected VSC during asymmetric faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(2): 2140-2154.
- [28] FANG X, YAO J, LIU R K, et al. Small-signal stability analysis and current control reference optimization algorithm of DFIG-based WT during asymmetric grid faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7750-7768.
- [29] YUAN G F, LIANG R P, HOU X J. Control strategy of DFIG under unbalanced grid voltage conditions based on complex-vector-resonant regulator [C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), August 11-14, 2017, Sydney, Australia: 1-6.

[30] WANG T, NIAN H, ZHU Z Q, et al. Flexible compensation strategy for voltage source converter under unbalanced and harmonic condition based on a hybrid virtual impedance method [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7656-7673.

徐 上(1997—),男,博士研究生,主要研究方向:双馈风电机组并网变流器控制技术及应用。E-mail:sdzcxs1997@

126.com

谢 震(1976—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:大功率风力发电用并网变流器。E-mail: ppsd2003xie@sina.com

杨曙昕(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源发电系统并网技术。E-mail:953835321@qq.com

(编辑 冯慧敏)

## Optimization Strategy for Rotor-side Converter of Grid-forming DFIG-based Wind Turbines Under Unbalanced Weak Grid

XU Shang<sup>1</sup>, XIE Zhen<sup>1</sup>, YANG Shuxin<sup>2</sup>, LI Mengjie<sup>1</sup>, YANG Shuying<sup>1</sup>, ZHANG Xing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Training Center of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd, Hefei 230011, China)

**Abstract:** When doubly-fed wind turbine units operate under unbalanced power grid, the system has positive and negative sequence paths. With the weakening of power grid strength, the coupling between the turbine and the grid intensifies, and disturbances in unbalanced stator voltage will affect the normal operation of the system. In order to study the unbalanced operation and stability mechanism of doubly-fed wind turbine units under weak grid, firstly, a small-signal state-space model of doubly-fed wind turbine unit is constructed, and the stability and unbalance degree of positive and negative sequence rotor current control are analyzed based on the system model. Then, the optimal control strategy based on adaptive virtual impedance is proposed to realize the cooperative compensation of the unbalanced stator voltage and current under the weak grid. The theoretical analysis proves that the proposed strategy effectively improves the stability of the doubly-fed wind turbine units under the unbalanced weak grid. Finally, through the hardware-in-the-loop experiment platform, the effectiveness of the proposed optimization strategy is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No.52377177).

**Key words:** weak grid; doubly-fed wind turbine unit; unbalanced grid; grid-forming control; negative sequence control; state-space modeling



附录 A

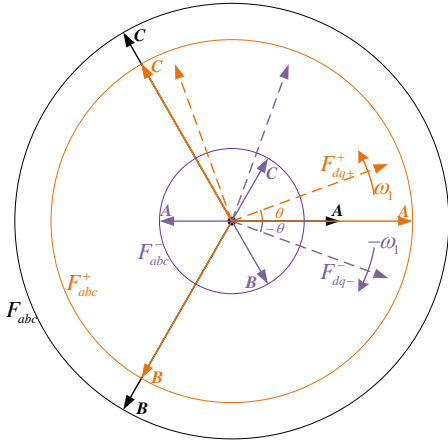


图 A1 矢量控制坐标系示意图

Fig. A1 Schematic diagram of vector control coordinate system

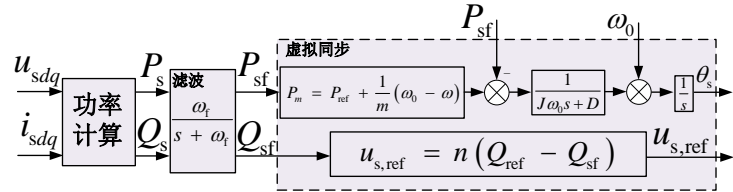


图 A2 功率外环控制结构

Fig. A2 Power-loop control structure

图 A2 中,  $m, n$  为有功、无功下垂系数;  $D, J$  代表阻尼系数和转动惯量;  $\omega_0$  为额定电角速度。  $\omega_t$  为低通滤波器的截止频率, 用以滤除功率中的谐波分量。

图 A6 中,  $Z_{rsc}, Z_{gsc}$  则分别为转子侧和网侧变流器的等效阻抗。

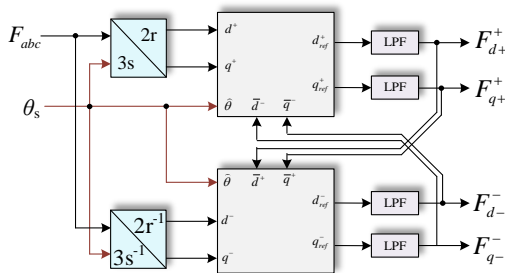


图 A3 PSC-DDSRF 结构图

Fig. A3 PSC-DDSRF structural diagram

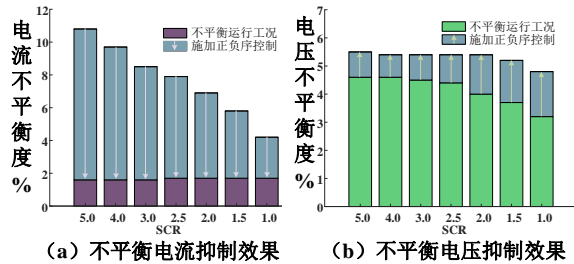


图 A4 基于正、负序控制不平衡度抑制效果图

Fig. A4 Simulation diagram of imbalance degree based on positive and negative sequence control

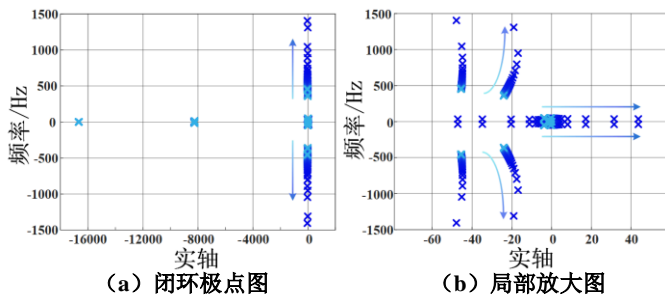


图 A5 正、负序控制 SCR 变化时系统特征根轨迹

Fig. A5 Positive and negative sequence control: system characteristic root trajectory when SCR changes

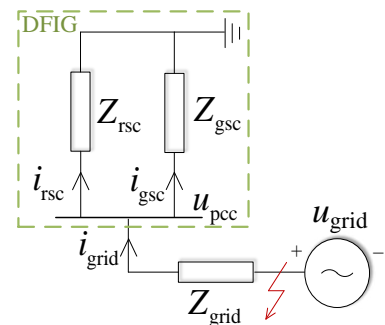


图 A6 双馈风电机组并网系统阻抗等效图

Fig. A6 Impedance equivalent diagram of DFIG grid connected system

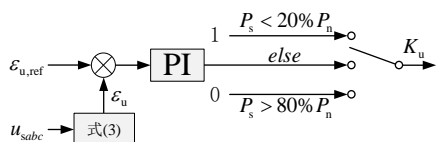


图 A7 协同系数无静差控制结构图  
Fig. A7 Collaborative coefficient no static error control structure diagram

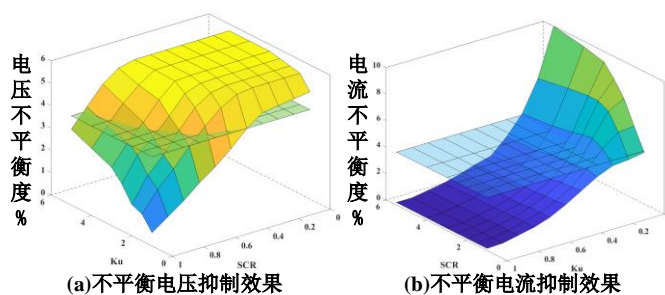


图 A8 协同补偿控制不平衡度效果图  
Fig. A8 Collaborative compensation control imbalance effect diagram

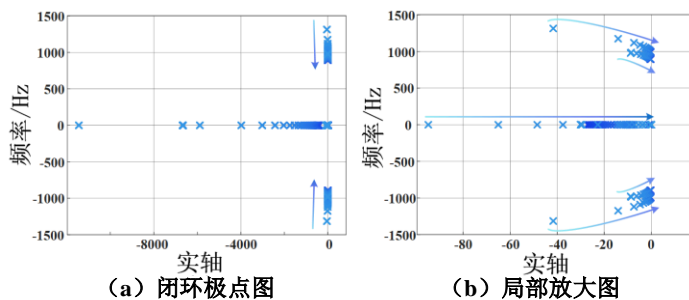


图 A9 基于协同控制 SCR 变化时系统特征根轨迹

Fig. A9 System characteristic root trajectory based on collaborative control of SCR changes

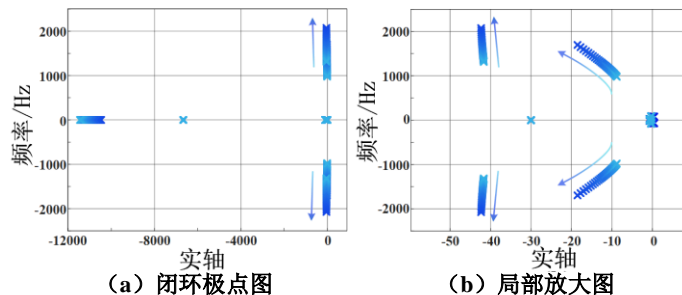


图 A10 基于协同控制  $K_u$  变化时系统特征根轨迹

Fig. A10 System characteristic root trajectory based on collaborative control of  $K_u$  changes

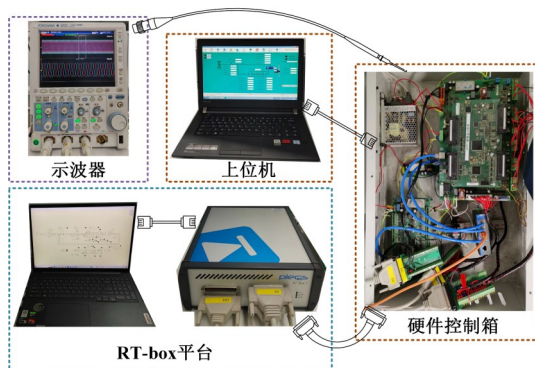
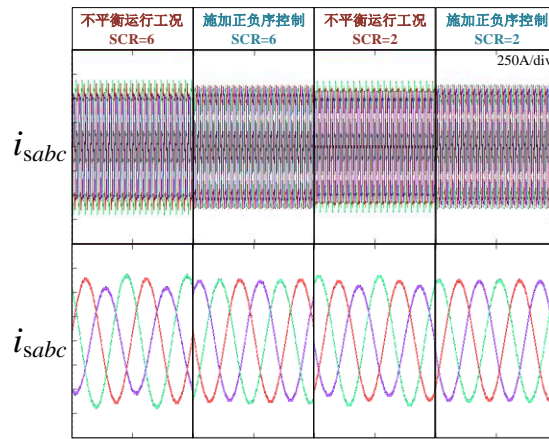
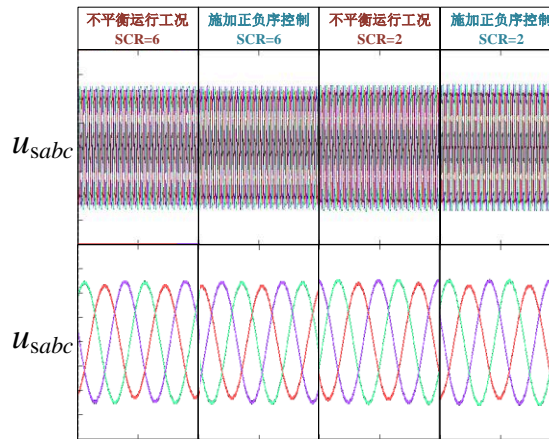


图 A11 2 WM 硬件在环实验平台示意图

Fig. A11 2 WM control-hardware-in-the-loop simulation platform



(a) 不平衡定子电流抑制效果



(b) 不平衡定子电压抑制效果

图 A12 正、负序转子电流控制负序分量抑制情况

Fig. A12 Suppression of negative sequence components in positive and negative sequence rotor current control

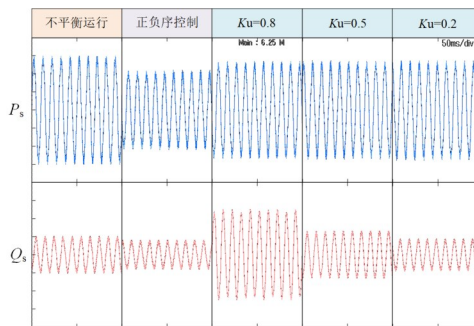


图 A13 功率脉动抑制效果

Fig. A13 Effect diagram of power pulsation suppression

## 附录 B

表 B1 2 MW 双馈风电机组测试系统硬件电气参数  
Table B1 2 MW DFIG hardware electrical parameters

| 参数         | 数值        | 参数            | 数值              |
|------------|-----------|---------------|-----------------|
| 额定功率       | 2M W      | 定子电感 $L_s$    | 0.0029 H        |
| 定子电压       | 690 V     | 转子电感 $L_r$    | 0.0034 H        |
| 转子电压       | 1835 V    | 定子电阻 $R_s$    | 0.0055 $\Omega$ |
| 互感 $L_m$   | 0.0027 H  | 转子电阻 $R_r$    | 0.0045 $\Omega$ |
| 极对数        | 2         | 直流电容 $C_{dc}$ | 0.015 F         |
| 滤波电感 $L_f$ | 0.00035 H | 滤波电容 $C_f$    | 0.001 F         |

## 附录 C

$$\mathbf{X}_{pn} = [i_{s,d,+}^+, i_{s,q,+}^+, i_{s,d,-}^-, i_{s,q,-}^-, i_{r,d,+}^+, i_{r,q,+}^+, i_{r,d,-}^-, i_{r,q,-}^-, i_{grid,d,+}^+, i_{grid,q,+}^+, u_{s,d,+}^+, u_{s,q,+}^+, i_{grid,d,-}^-, i_{grid,q,-}^-, u_{s,d,-}^-, u_{s,q,-}^-, P_{sf}^+, Q_{sf}^+, \omega^+, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \quad (C1)$$

$$\mathbf{X}_{col\pm} = [i_{s,d,\pm}^\pm, i_{s,q,\pm}^\pm, i_{r,d,\pm}^\pm, i_{r,q,\pm}^\pm, i_{grid,d,\pm}^\pm, i_{grid,q,\pm}^\pm, u_{s,d,\pm}^\pm, u_{s,q,\pm}^\pm, P_{sf,\pm}^\pm, Q_{sf,\pm}^\pm, x_{1,\pm}^\pm, x_{2,\pm}^\pm, x_{3,\pm}^\pm, x_{4,\pm}^\pm, x_{5,\pm}^\pm, x_{6,\pm}^\pm, x_{R,1,d,\pm}^\pm, x_{R,1,q,\pm}^\pm, x_{R,2,d,\pm}^\pm, x_{R,2,q,\pm}^\pm]^T \quad (C2)$$