

并网DFIG多通道附加阻尼控制器设计及其控制参数整定

李生虎^{1,2},张奥博^{1,2},夏伟健^{1,2},汪 壮^{1,2}

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009;
2. 新能源利用与节能安徽省重点实验室,安徽 合肥 230009)

摘要:针对双馈感应发电机(DFIG)并网电力系统中多低频振荡(LFO)抑制的问题,提出一种基于DFIG的多通道附加阻尼控制器(MBSDC)设计及其参数整定方法,用于增加系统多LFO模式的阻尼。建立DFIG并网系统状态矩阵,由特征值分析筛选出待抑制的LFO模式,并设计了MBSDC控制策略。在DFIG-MBSDC系统线性化模型基础上,推导目标LFO模式对相应抑制通道传递函数灵敏度的解析表达,以量化多LFO模式与MBSDC传递函数间的联系,应用于控制参数整定。特征值分析与时域仿真结果表明,所提DFIG-MBSDC能抑制DFIG系统中多LFO模式。基于传递函数灵敏度对控制参数进行整定,提高多LFO的抑制效果。

关键词:双馈感应发电机;风电系统;低频振荡;多通道附加阻尼控制器;传递函数灵敏度

中图分类号:TM712;TM614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202211027

0 引言

大规模风电并网后,风电机组如双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)与同步发电机(synchronous generator, SG)的动态交互^[1],改变了电网潮流的分布,影响了系统的振荡模式。弱阻尼的低频振荡(low-frequency oscillation, LFO),威胁电网稳定运行^[2]。

抑制DFIG并网系统的LFO,可通过加装附加阻尼控制器(supplementary damping controller, SDC),如加装电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)、功率振荡阻尼器(power oscillation damper, POD)等装置以提升系统阻尼^[3-4]。文献[5]验证了在DFIG转子侧变流器(rotor side converter, RSC)有功外环侧加装POD,对区间振荡模式有较好的抑制效果。文献[6]基于轨迹灵敏度设计了DFIG-PSS参数,仿真结果表明DFIG振荡和SG功角差都得到了抑制。文献[7]协调优化SG的PSS和DFIG的SDC,提高了SDC抑制振荡的能力。阻尼控制信号的引入能够抑制振荡,但同时可能造成被控设备动态特性的恶化^[8]。文献[9]基于平衡截断法建立DFIG传递函数降阶模型,量化了POD引入对DFIG动态特性的影响。

上述针对抑制系统LFO的研究,通常采用单输入SDC,待抑制模式为阻尼比最小的临界振荡模式。实际电力系统振荡是多种振荡耦合作用的结果,针对单一模式的抑制策略可能会对其他振荡造成不利

影响。针对阻尼控制策略或参数调优算法的改进,可以提高系统的整体阻尼特性。多频段PSS(如PSS4B)有低、中、高3个频段的阻尼通道,文献[10]基于频域裕度指标研究了控制参数的整定。文献[11]设计了多SG电力系统多频段PSS,每一频段抑制一种LFO模式。文献[12]设计了一种多通道SDC(multi-band SDC, MBSDC),采用遗传算法协调优化控制器参数,以改善不同频段振荡模式。采用启发式算法针对上述控制策略的参数进行优化,应用于如DFIG并网的高阶非线性系统中,计算量较大。

目前针对DFIG并网系统中MBSDC用于多LFO模式的抑制研究较少,其难点在于如下2个方面。

1) 基于DFIG并网系统设计MBSDC,应考虑如何协调分配阻尼以同时对多LFO模式进行抑制;同时应尽可能减少SDC的引入对DFIG动态性能的影响。

2) 多LFO模式、不同抑制通道以及参数间的交互影响控制器对振荡模式的抑制效果,造成了参数整定的困难,特征值灵敏度反映了特征值随参数改变的变化趋势,可用于参数整定和动态稳定性分析^[13-14]。但特征值灵敏度反映的是特征值与参数的线性关系,若将抑制通道的传递函数看作独立变量,则采用传递函数灵敏度方法分析各抑制通道传递函数与对应LFO模式间的关系,保留了控制器的局部非线性模型。文献[15]将传递函数灵敏度应用于DFIG-PSS参数的优化,用于抑制DFIG引入模式。

本文对DFIG并网系统中多LFO模式的抑制策略进行研究,提出了基于DFIG并网系统的MBSDC,并基于传递函数灵敏度进行了参数整定。首先建立了系统线性化模型,筛选LFO模式,基于模式信息设计MBSDC。其次考虑MBSDC参数对LFO调节的相互影响,将控制器传递函数视作独立变量,推导特征

收稿日期:2022-08-02;修回日期:2022-11-13

在线出版日期:2022-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877061)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877061)

值对各抑制通道传递函数灵敏度,基于改进的灵敏度算法得到特征值变化量与抑制通道变化量的关系,用于整定参数。仿真结果验证了设计的MBSDC对多LFO模式的抑制效果,并验证了参数整定的有效性。

1 DFIG 并网系统小扰动建模

1.1 DFIG 与 SG 控制结构

DFIG由风力机及其传动轴(3阶)、桨距角控制(2阶)、感应电机(4阶)、背靠背变流器及直流电容(9阶)组成。桨距角控制用于维持风力机转速和DFIG有功出力,传动轴采用两质量块模型。背靠背变流器包括RSC和网侧变流器(grid side converter, GSC),均采用功率外环/电流内环的双环控制,控制结构如附录A图A1所示。

SG动态结构包括转子方程(2阶)、电磁暂态(1阶)、励磁系统(1阶)和调速系统(1阶),SG控制模型如附录A图A2所示。

1.2 系统线性化模型

针对DFIG并网系统中多LFO的抑制问题,首先需要得到系统中振荡模式信息。建立DFIG并网系统状态方程和代数方程:

$$\begin{cases} p\mathbf{x}_{SG} = \mathbf{f}_{SG}(\mathbf{x}_{SG}, \mathbf{y}_{SG}, \mathbf{y}_{sys}) \\ p\mathbf{x}_{DFIG} = \mathbf{f}_{DFIG}(\mathbf{x}_{DFIG}, \mathbf{y}_{DFIG}, \mathbf{y}_{sys}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 = \mathbf{g}_{SG}(\mathbf{x}_{SG}, \mathbf{y}_{SG}, \mathbf{y}_{sys}) \\ 0 = \mathbf{g}_{DFIG}(\mathbf{x}_{DFIG}, \mathbf{y}_{DFIG}, \mathbf{y}_{sys}) \\ 0 = \mathbf{g}_{sys}(\mathbf{y}_{sys}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 表示微分算子; \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 分别为状态变量和代数变量的向量形式; \mathbf{f} 、 \mathbf{g} 分别为状态方程和代数方程的函数形式;下标 sys 、 SG 、 $DFIG$ 分别表示DFIG并网系统、SG控制系统、DFIG控制系统。

在稳态运行点处对式(1)、(2)线性化,联立得到DFIG并网系统的线性化模型:

$$\begin{cases} p \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{SG} \\ \Delta \mathbf{x}_{DFIG} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{SG} \\ \Delta \mathbf{x}_{DFIG} \\ \Delta \mathbf{y}_{SG} \\ \Delta \mathbf{y}_{DFIG} \\ \Delta \mathbf{y}_{sys} \end{bmatrix} \\ p\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})\Delta \mathbf{x} = \mathbf{A}_{sys}\Delta \mathbf{x} \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 为系数矩阵; Δ 表示变化量; \mathbf{A}_{sys} 为系统状态矩阵。由 \mathbf{A}_{sys} 可以计算振荡模式、阻尼比、频率、参与因子等信息。

2 MBSDC 设计

2.1 MBSDC 设计思路

基于DFIG的传统单通道结构SDC控制回路,通常选择SG转速 ω_{sc} 作为反馈信号。由于在最大功率

点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)方式下,DFIG不仅具有向下调节出力能力,而且由于转子动能、扭转势能变化等,在短时间内可以超过最大功率点,具有向上调节出力能力,因此可将SDC加装在RSC有功外环,输出作为DFIG有功调制的信号,以抑制电力系统LFO。当电网中存在多种振荡模式时,与每个模式强相关的SG不同,因此所需输入信号也有差异。针对单一振荡模式抑制的SDC,很难同时抑制多种LFO模式。

DFIG传动轴系多质量块间扭转,产生轴系振荡。如式(4)所示轴系方程中,附加有功调制信号的引入会改变DFIG电磁转矩 T_e ,DFIG转速 ω_r 会随 T_e 变化,最终改变机械转矩 T_m ,可能会造成DFIG轴系振荡的恶化。基于DFIG的MBSDC,需要在提升多LFO模式阻尼的同时,尽可能改善轴系振荡。

$$\begin{cases} 2H_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_m - K_{wt}\gamma - D(\omega_t - \omega_r) \\ 2H_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_e + K_{wt}\gamma + D(\omega_t - \omega_r) \\ \frac{dy}{dt} = \omega_b(\omega_t - \omega_r) \end{cases} \quad (4)$$

式中: H_t 、 H_r 分别为风力机和DFIG的惯性时间常数; ω_t 、 ω_r 分别为风力机和DFIG的转速; ω_b 为转速基准值; K_{wt} 、 D 分别为扭矩系数和阻尼系数; γ 为扭转角。

本文所提MBSDC应包含 n 种LFO模式和DFIG轴系振荡多模式阻尼抑制通道,控制结构如图1所示。图中: K_i 、 T_{hi} 、 T_{dli} 和 T_{dri} 、 u_i 分别为第 i 种LFO模式抑制通道的增益系数、隔直环节时间常数、超前和滞后环节的时间常数、输出信号; K_g 、 T_{hg} 、 T_{dg} 、 u_g 分别为DFIG轴系振荡模式下阻尼抑制通道的增益系数、隔直环节时间常数、超前滞后环节时间常数及输出信号; P_s 、 P_s^* 分别为DFIG定子功率及其参考值; N 为超前滞后环节总数。其中LFO抑制通道由滤波环节和阻尼控制环节两部分组成。滤波环节的作用为将LFO模式解耦,消除模式间的相互影响,采用二阶带通滤波器,第 i 种LFO模式抑制通道的滤波器的传递函数 $G_{fi}(s)$ 表达式如式(5)所示。

$$G_{fi}(s) = \frac{2\xi_i\omega_{ci}s}{s^2 + 2\xi_i\omega_{ci}s + \omega_{ci}^2} \quad (5)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; ω_{ci} 为第 i 种LFO模式抑制通道的滤波器的中心角频率, $\omega_{ci} = 2\pi f_{ci}$, f_{ci} 为第 i 种LFO模式抑制通道的滤波器的中心频率; ξ_i 为第 i 种LFO模式抑制通道的滤波器的阻尼比。

阻尼控制环节参照典型PSS结构,包括增益环节、隔直环节以及超前滞后环节,其中增益环节用于提升模式阻尼,隔直环节用于滤出稳态分量,超前滞后环节用于补偿相位。超前滞后环节的传递函数 $H(s)$ 如式(6)所示。一般每个超前滞后环节大约可

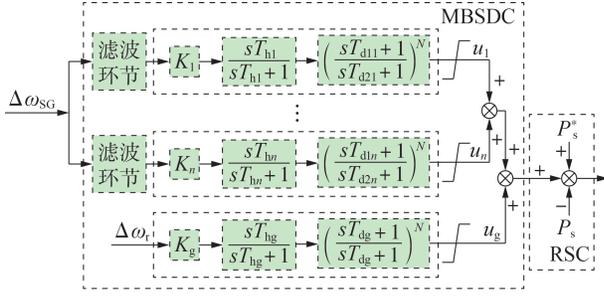


图1 MBSDC控制结构

Fig.1 Control structure of MBSDC

补偿 60° , 考虑实际电网允许功角差一般远小于 180° , 本文取 $N=2$ 。

$$H(s) = \left(\frac{sT_{di} + 1}{sT_{di} + 1} \right)^N \quad (6)$$

第 i 种 LFO 模式抑制通道的阻尼控制环节传递函数 $G_i(s)$ 如式 (7) 所示。

$$G_i(s) = K_i \frac{sT_{hi} + 1}{1 + sT_{hi}} \left(\frac{sT_{di} + 1}{sT_{di} + 1} \right)^N \quad (7)$$

DFIG-MBSDC 并网的闭环电力系统模型如图 2 所示。图中: P_{DFIG} 、 Q_{DFIG} 分别为 DFIG 有功、无功功率; V_{PCC} 、 θ_{PCC} 分别为并网点电压幅值和相角; P_{SGi} 、 Q_{SGi} 分别为第 i 种 LFO 模式下 SG 的有功、无功功率。大型风电场与 SDC 控制环节构成系统阻尼控制回路, 其中 MBSDC 可通过广域测量系统接收转速信号, 生成有功调制信号引入 RSC 有功外环, 调制 DFIG 以实现电力系统稳定运行。MBSDC 的输出信号 P_{MBSDC} 表达式如式 (8) 所示。

$$P_{MBSDC} = \sum_{i=1}^n \omega_i G_i(s) G_i(s) \quad (8)$$

式中: ω_i 为与待抑制 LFO 模式强相关发电机组的转速。

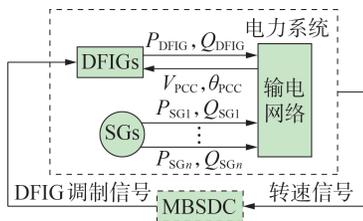


图2 闭环DFIG并网系统模型

Fig.2 Model for closed-loop DFIG integrated system

2.2 MBSDC 参数整定

本节提出一种 SDC 参数协调整定的方法。将待整定目标第 i 种 LFO 模式的特征值 λ_i 看作控制参数的函数, λ_i 与控制参数 α 的线性关系可以表示为:

$$\Delta \lambda_i = \sum_{j=1}^M \left(\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j \right) \quad (9)$$

式中: M 为 MBSDC 控制参数总数; $\partial \lambda_i / \partial \alpha_j$ 为参数灵

敏度, 可用于确定控制参数整定方向, 并近似求解特征值随控制参数变化的结果。MBSDC 有多个待整定控制参数, 控制参数的改变会影响灵敏度的结果, 且式 (9) 无法体现 MBSDC 非线性特征。

采用传递函数灵敏度描述特征值与传递函数整体变化量之间的关系。参照式 (9), 第 i 种 LFO 模式的特征值变化量 $\Delta \lambda_i$ 与各抑制通道传递函数变化量 ΔG_i 的函数关系可表示为:

$$\Delta \lambda_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial G_i} \Delta G_i(\alpha_i, \lambda_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial \lambda_i}{\partial G_j} \Delta G_j(\alpha_j, \lambda_j) \quad (10)$$

可以看出, $\Delta \lambda_i$ 由特征值对传递函数的灵敏度 $\partial \lambda_i / \partial G_i$ 和各抑制通道的 ΔG_i 决定。传递函数灵敏度的数值反映了抑制通道对 LFO 模式提供的阻尼大小。 ΔG_i 由控制参数和特征值变化量共同决定。

传递函数灵敏度的解析表达可类似于计算控制参数灵敏度的方法, 将抑制通道的传递函数视作独立变量, 写入系统状态方程中, 推导过程如附录 B 式 (B1) — (B5) 所示。将式 (B4)、式 (B5) 与式 (10) 联立, 得到目标模式特征值的变化量与传递函数变化量之间的关系为:

$$\left(1 - \frac{\partial \lambda_i}{\partial G_i} G'_i(\lambda_i) \right) \Delta \lambda_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial \lambda_i}{\partial G_j} G'_j(\lambda_j) \Delta \lambda_j = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \lambda_i}{\partial G_j} \Delta G_j(\alpha_j, \lambda_{j0}) \quad (11)$$

式中: $G'_i(\lambda_i)$ 为 $G(\lambda_i)$ 关于特征值 λ_i 的偏导数。为方便表示, 将式 (11) 中 $\Delta \lambda$ 前的部分系数记作 r_{ij} , 如式 (12) 所示。

$$r_{ij} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial G_j} G'_j(\lambda_j) \quad (12)$$

则式 (11) 可简化为:

$$(1 - r_{ii}) \Delta \lambda_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n r_{ij} \Delta \lambda_j = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \lambda_i}{\partial G_j} \Delta G_j(\alpha_j, \lambda_{j0}) \quad (13)$$

不同抑制通道的控制参数整定对多 LFO 模式的影响是交互的, 即以某一 LFO 模式为目标模式的抑制通道, 在进行其控制参数的整定时, 也会对其他 LFO 模式的调节效果产生影响。对于系统中 n 个待改善的 LFO 模式, 将式 (13) 写成可描述特征值和传递函数变化量之间关系的矩阵形式:

$$R \Delta L = H \Delta F \quad (14)$$

式中: ΔL 、 R 、 H 和 ΔF 分别为特征值变化量、灵敏度系数、传递函数灵敏度和传递函数变化量的矩阵或向量形式, 以上变量的表达式分别见式 (15) — (18)。

$$\Delta L = [\Delta \lambda_1 \quad \cdots \quad \Delta \lambda_n]^T \quad (15)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 - r_{11} & \cdots & -r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -r_{n1} & \cdots & 1 - r_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial \lambda_1}{\partial G_1} & \cdots & \frac{\partial \lambda_1}{\partial G_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \lambda_n}{\partial G_1} & \cdots & \frac{\partial \lambda_n}{\partial G_n} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\Delta F = [\Delta G_1(\alpha) \cdots \Delta G_n(\alpha)]^T \quad (18)$$

整定控制参数目的是进一步提升LFO模式的阻尼比,则设定待改善LFO模式特征值的目标整定值为 λ^* ,本文中选取特征值整定值为将模式阻尼比提升至0.03,可得 $\Delta L = [\lambda_1^* - \lambda_1, \cdots, \lambda_n^* - \lambda_n]^T$ 。分别计算特征值对各抑制通道传递函数灵敏度的结果,代入式(19)得到所需的传递函数变化量 ΔF 。

K_i 和 T_{d1i} 、 T_{d2i} 的改变都将引起传递函数变化,若通过调节 T_{d2i} 以满足相位补偿,在得到传递函数变化量后,由式(19)计算第 i 种LFO模式抑制通道的 ΔT_{d2i} :

$$\Delta T_{d2i} = \frac{\Delta G_i}{K_i \frac{sT_{hi}}{1+sT_{hi}} \frac{-2s(1+sT_{d1i})^2}{(1+sT_{d2i})^3}} \quad (19)$$

为评估MBSDC对LFO的抑制效果,采用平方误差积分(integral of squared error, ISE)指标和振荡收敛时间评估LFO模式抑制效果和振荡收敛情况。ISE越小,表明振荡抑制效果越好。

综上,本文建立了DFIG并网电力系统、MBSDC的控制模型,并采用传递函数灵敏度的方法建立了LFO模式与阻尼控制通道之间的关系。通过整定MBSDC控制参数抑制DFIG并网系统中多LFO模式。

2.3 算法适用性讨论

本文算法是针对等值后风电场。对于含多台DFIG的风电场所提控制器设计仍然适用,只是计算量增大和实现难度增加。例如1台600 MW火电机组,状态变量不超过20个。而1座相同容量DFIG风电场,单机容量为2 MW,按照本文每台DFIG 18个状态变量计算,则状态变量的总数为5400个。现有风电动态仿真和稳定控制研究也大多基于相同风速,将风电场等值为单台或有限几台机组,在表1中

表1 现有文献中风电场建模方式

Table 1 Wind farm modeling method in literatures

文献	风电场建模方式
[16]	采用单台DFIG等值,DFIG建模忽略RSC、GSC电流控制环
[17]	采用单台PMSG等值,PMSG建模将风力机、发电机以及机侧变流器聚合等效为1个电流源
[18]	采用单台DFIG等值,DFIG建模只考虑变流器模型,未考虑感应电机
[2-4],[6-9]	采用单台DFIG等值,DFIG建模包括轴系、感应电机、背靠背变流器
[19]	采用多台DFIG等值,将风电场内部风速、运行状态相近的DFIG等值为1台风机
[20-21]	采用多台DFIG、PMSG等值,忽略风机间参数和风速差异的影响

列出部分文献对风电场的建模方式,表中PMSG表示直驱风机。随着计算性能的提高,有望将本文所提算法拓展至含多台DFIG的风电场场景中。

另一方面,稳定控制一般先考虑在单一场景下有效性,然后再拓展至多场景。因此本文研究DFIG并网系统振荡抑制是针对给定运行场景。当运行场景变化时,所提MBSDC的控制策略仍然适用,但是需要核实控制参数的有效性。

3 算例分析

本文采用新英格兰39节点测试系统进行算例分析,其结构如附录C图C1所示,分别在9、14号节点接入风电场1、2。其中,风电场1由200台DFIG组成,风速为12 m/s;风电场2由150台DFIG组成,风速为9 m/s。DFIG基准功率为100 MV·A,结构和控制参数见文献[22]。

3.1 LFO模式分析

为研究DFIG并网对电力系统LFO影响,比较其并网前、后特征值,LFO模式阻尼比 ξ 和频率 f 如表2所示。表中:模式11/12—28/29对应DFIG并网前的9种LFO模式;模式32/33—59/60对应DFIG并网后的11种LFO模式。DFIG并网后降低了部分原有模式的阻尼比,同时引入与DFIG轴系强相关的模式32/33、34/35;模式41/42、43/44、45/46以及55/56下DFIG并网后的阻尼比小于3%,属于弱阻尼LFO模式^[23],可将其设为目标模式进行抑制。

表2 DFIG对LFO模式的影响

Table 2 Influence of DFIG on LFO modes

模式	ξ	f /Hz	模式	ξ	f /Hz
11/12	0.0375	1.4776	34/35	0.0719	2.3621
13/14	0.0337	1.4189	39/40	0.0313	1.2899
15/16	0.0271	1.2709	41/42	0.0252	1.2177
18/19	0.0465	1.2298	43/44	0.0165	1.1755
20/21	0.0552	1.1042	45/46	0.0235	1.0647
22/23	0.0481	1.1092	47/48	0.0226	0.9619
24/25	0.0585	1.0587	51/52	0.0379	0.9285
26/27	0.0668	0.9199	53/54	0.0301	0.9066
28/29	0.0263	0.8382	55/56	0.0242	0.8290
32/33	0.0718	2.3624	59/60	0.0462	0.8395

为了分析单通道SDC对LFO模式的影响,选择阻尼比最小的临界振荡模式 $\lambda_{43/44}$ 。由相关因子可知模式43/44与 SG_2 (与节点31相连)强相关,选择 SG_2 转速作为SDC输入信号,LFO模式见附录C表C1。对比表2中的振荡模式阻尼比,临界振荡模式阻尼比由0.0165提升至0.0324,但模式42/43和模式50/51阻尼比分别由0.0252、0.0235降低至0.0202、0.0197,阻尼水平恶化。由相关因子分析,模式42/43和模式50/51与 SG_2 同样存在较强的

相关性。以上 3 种模式存在耦合,针对 $\lambda_{43/44}$ 设计的 SDC 无法抑制另 2 种模式。反馈信号和控制参数选择不当,可能恶化部分 LFO 模式。

3.2 MBSDC 有效性验证

基于 3.1 节,系统共有 4 个待抑制的弱阻尼模式,因此 MBSDC 抑制通道为 4 条。为分析 MBSDC 抑制效果,分别在 2 座风电场装设 MBSDC,计算结果见表 3。MBSDC 并网后,各 LFO 模式阻尼比均得到提升,没有产生 LFO 恶化情况。因为不同抑制通道可为多 LFO 模式提供阻尼,对比 SDC 对 LFO 抑制效果,对于临界振荡模式 $\lambda_{45/46}$,MBSDC 阻尼提升效果不如 SDC。对比安装在不同风电场的抑制效果,在风电场 1 安装 MBSDC 效果更优。表 3 中 LFO 模式阻尼比在安全范围外,弱阻尼 LFO 仍存在,因此有必要整定 MBSDC 控制参数,以提升抑制效果。

表 3 MBSDC 对 LFO 模式的影响

Table 3 Influence of MBSDC on LFO modes

模式	ξ		f / Hz	
	风电场 1	风电场 2	风电场 1	风电场 2
41 / 42	0.0283	0.0237	1.2073	1.2380
43 / 44	0.0230	0.0215	1.1164	1.1756
45 / 46	0.0279	0.0241	0.9669	1.0639
53 / 54	0.0278	0.0272	0.8148	0.8216

为进一步验证特征值分析结果,对 MBSDC 并网前、后系统进行时域仿真。设 29 号节点在 0.5 s 时发生三相短路故障,0.6 s 时故障切除,仿真时间为 20 s。采用与 LFO 模式强相关机组的功角差 $\delta_{a,b}$ 用来描述 LFO 模式动态过程,时域仿真结果如图 3 所示。相较于 MBSDC 配置前,MBSDC 配置后功角差振荡幅值降低,更快恢复到稳定状态,增强了系统阻尼特性,实现了多 LFO 模式的抑制。

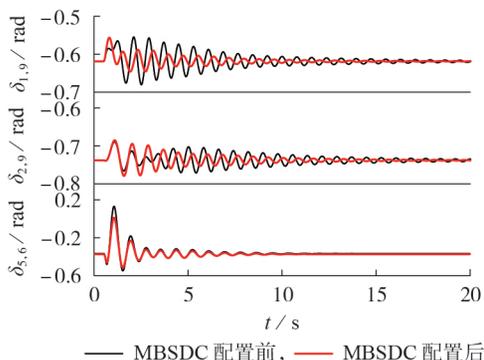


图 3 MBSDC 对功角振荡的阻尼抑制效果

Fig.3 Damping suppression effect of MBSDC on power angle oscillation

为分析 MBSDC 对 DFIG 的影响,图 4 和附录 C 图 C2 分别给出 MBSDC 配置前、后 DFIG 有功 P_{DFIG} (标么值)和转速的动态响应曲线。可以看出:MBSDC 通过调制 DFIG 有功输出抑制 LFO;由于 SDC 并网使 ω_r

的波动程度增大,表明 DFIG 动态性能受到恶化,反映了 DFIG 轴系振荡加剧,但 MBSDC 存在 DFIG 的轴系振荡抑制通道,可为轴系振荡模式提供阻尼,使得 ω_r 的振荡幅度减缓,削弱 MBSDC 对 DFIG 动态特性的影响,避免轴系振荡模式进一步恶化。

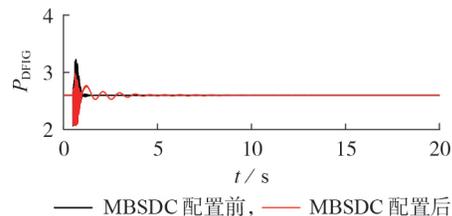


图 4 MBSDC 对 DFIG 有功的影响

Fig.4 Influence of MBSDC on active power of DFIG

3.3 MBSDC 参数整定效果验证

基于特征值对传递函数灵敏度绘制了 $\lambda_{41/42}$ 随 T_{d2} 变化的实际曲线,将其与以传递函数灵敏度方法绘制的特征值变化曲线进行对比,结果如图 5 所示。其中,传递函数灵敏度方法绘制特征值变化曲线是通过修改控制参数变化量 $\Delta\alpha$,得到传递函数的变化量 ΔG ,再根据传递函数灵敏度结果 $\Delta\lambda/\Delta G$ 计算得到特征值的变化量。2 条曲线在初始运行点相切,且变化趋势一致,验证了传递函数灵敏度解析表达的正确性。而且基于传递函数灵敏度模型结果更能描述特征值的非线性变化。

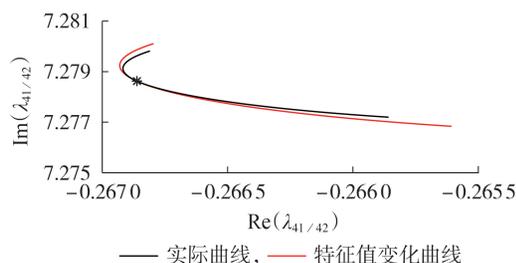


图 5 传递函数灵敏度模型验证

Fig.5 Validation of functional sensitivity model

传递函数灵敏度结果如附录 C 表 C2 所示。对 LFO 模式主导抑制通道的灵敏度数值,通常大于对非主导抑制通道传递函数的灵敏度。因此在整定控制参数时,首先计算各通道传递函数对 LFO 模式的偏导数 $G'_i(\lambda_i)$,再由式 (14) 计算特征值增量。最后将传递函数变化量 $\Delta G(\alpha)$ 代入式 (19),计算控制参数变化量 $\Delta\alpha$,即可将阻尼比提升到安全水平(如 0.03),如附录 C 表 C3 所示。

为比较 MBSDC 控制参数整定前、后 LFO 模式的抑制效果,基于传递函数灵敏度对控制参数进行整定,图 6 为控制参数整定前、后,强相关 SG 功角差的时域仿真曲线。相较于 MBSDC 控制参数整定前,功角差曲线的振幅降低,说明 DFIG 阻尼振荡抑制能力增强,提升了 MBSDC 对 LFO 模式的抑制效果。为检

验所提控制策略的算法适应性,设风电场2的风速由 9 m/s 变化至 12 m/s ,再进行时域仿真分析,SG功角差振荡曲线如附录C图C3所示。由图可知:控制参数整定后当风电场风速变化时,MBSDC仍能抑制系统中多LFO模式。

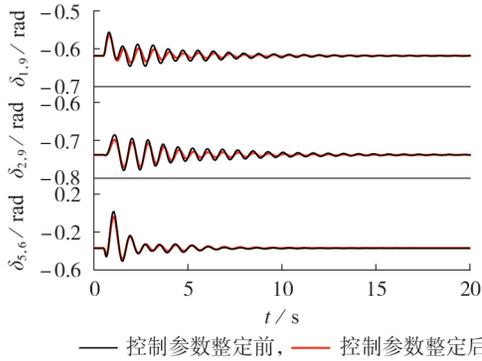


图6 MBSDC控制参数整定对多LFO模式抑制效果

Fig.6 Suppression impact of control parameter setting of MBSDC on multi-LFO modes

分别计算MBSDC配置前、后的ISE指标和振荡收敛时间,如附录C表C4所示。MBSDC配置前, $\delta_{1,9}$ 和 $\delta_{2,9}$ 在 20 s 内振荡并未收敛, $\delta_{5,6}$ 在 12.87 s 时振荡收敛;MBSDC配置后,功角差振荡收敛时间分别提前至 15.95 、 18.05 、 11.26 s ,且ISE指标分别降低 3.8% 、 12.33% 、 1.9% ,LFO的抑制效果均得到提升。当控制参数整定后,收敛时间分别减少了 3.18 、 2.37 、 0.35 s ,ISE指标分别降低 3.2% 、 2.3% 、 1.0% ,LFO抑制效果得到进一步提升。

4 结论

为抑制DFIG并网系统中多LFO模式,本文提出了DFIG并网系统MBSDC的设计及参数整定方法。基于DFIG-MBSDC的电力系统状态空间方程,将LFO模式特征值变化量引入抑制通道传递函数变化量的表达式中,分析了振荡模式特征值与各抑制通道传递函数的变化量间的关系。基于特征值和时域仿真分析,得出以下结论:

- 1)相较于传统阻尼控制结构,MBSDC应用于DFIG并网系统,能实现多LFO模式的同时抑制,改善了附加控制信号的引入对DFIG动态性能的影响;
- 2)基于传递函数灵敏度对MBSDC控制参数进行整定,仿真结果表明功角振荡收敛时间分别减少了 3.18 、 2.37 、 0.35 s ,ISE指标最高降低了 3.2% ,LFO抑制效果得到进一步提升。

后续研究中可通过控制参数的优化实现鲁棒性控制,尽可能适应运行场景的变化。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] DU W, CHEN W, WANG H. Impact of dynamic interactions introduced by the DFIGs on power system electromechanical oscillation modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4954-4967.
- [2] 秦超,曾沉,苏寅生,等. 基于安全域的大规模风电并网系统低频振荡稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5):100-106. QIN Chao, ZENG Yuan, SU Yinsheng, et al. Low-frequency oscillatory stability analysis based on security region for power system with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5):100-106.
- [3] JALAYER R, OOI B. Co-ordinated PSS tuning of large power systems by combining transfer function-eigenfunction analysis (TFEA), optimization, and eigenvalue sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6):2672-2680.
- [4] 聂永辉,徐晗桐,蔡国伟,等. 含双馈风电机组系统的广域阻尼控制器协调优化策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10):79-84. NIE Yonghui, XU Hantong, CAI Guowei, et al. Coordinated optimal strategy of wide-area damping controller in doubly-fed wind turbine system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10):79-84.
- [5] EDRAH M, ZHAO X, HUNG W, et al. Effects of POD control on a DFIG wind turbine structural system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2):765-774.
- [6] 李生虎,张亚海,叶剑桥,等. 基于双馈风电机组控制参数优化的电网功角振荡控制[J/OL]. 电工技术学报. (2022-03-07) [2022-08-02]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211662>.
- [7] ZHANG C, KE D, SUN Y, et al. Coordinated supplementary damping control of DFIG and PSS to suppress inter-area oscillations with optimally controlled plant dynamics[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2):780-791.
- [8] 孙正龙,李浩博,刘铖,等. 含虚拟惯量的双馈风电机组扭振阻尼特性分析与抑制方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12):4671-4683. SUN Zhenglong, LI Haobo, LIU Cheng, et al. Torsional oscillation damping characteristics and suppression methods of doubly-fed induction generator with virtual inertia[J]. Power System Technology, 2021, 45(12):4671-4683.
- [9] LI S, ZHANG H, YAN Y, et al. Parameter optimization to power oscillation damper considering its impact on the DFIG[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2):1508-1518.
- [10] 江崇熙,石鹏,黄伟,等. 考虑多振荡模式的多频段电力系统稳定器参数整定方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4):142-149. JIANG Chongxi, SHI Peng, HUANG Wei, et al. Parameter setting method for multi-band power system stabilizer considering multiple oscillation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4):142-149.
- [11] ZHANG G, HU W, ZHAO J, et al. A novel deep reinforcement learning enabled multi-band PSS for multi-mode oscillation control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4):3794-3797.
- [12] 陈宝平,林涛,陈汝斯,等. 机侧与网侧多通道附加阻尼控制器参数协调综合抑制低频振荡和次同步振荡[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11):50-56, 62. CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Parameter coordination of generator-side and grid-side multi-channel supplementary damping controllers to suppress low-frequency oscillation and sub-synchronous oscillation comprehensively[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):50-56, 62.

- [13] 李生虎,方天扬,张浩,等. 基于机电回路相关比灵敏度的DFIG并网系统机电模式抑制[J]. 高电压技术,2021,47(10):3414-3425.
LI Shenghu, FANG Tianyang, ZHANG Hao, et al. Damping to electromechanical oscillation modes in DFIG-integrated system based on sensitivity of electromechanical loop participation ratio[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3414-3425.
- [14] 杨德友,赵康,王丽馨. 基于全局灵敏度的区间模式阻尼提升策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):113-119.
YANG Deyou, ZHAO Kang, WANG Lixin. Interval mode damping enhancement strategy based on global sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 113-119.
- [15] 李生虎,张浩. 风电系统振荡模式对DFIG-PSS传递函数的灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(16):11-17.
LI Shenghu, ZHANG Hao. Sensitivity analysis of the oscillation modes to the transfer function of DFIG-PSS in a wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 11-17.
- [16] SUN L, ZHAO X. Modelling and analysis of frequency-responsive wind turbine involved in power system ultra-low frequency oscillation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 844-855.
- [17] 徐衍会,滕先浩. 风电场内机群间次同步振荡相互作用[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):156-164.
XU Yanhui, TENG Xianhao. Interaction of subsynchronous oscillation between wind turbine clusters in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 156-164.
- [18] SHEN Y, MA J, WANG L, et al. Study on DFIG dissipation energy model and low-frequency oscillation mechanism considering the effect of PLL[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3348-3364.
- [19] 刘其辉,洪晨威,田若菡,等. 基于正交优选粒子群多机参数优化的风电SSO抑制方法[J]. 电网技术,2021,45(12):4660-4671.
LIU Qihui, HONG Chenwei, TIAN Ruohan, et al. Parameter optimization of multi-DFIGs for SSO mitigation based on orthogonal design and particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4660-4671.
- [20] DU W, WANG Y, WANG H. Analytical examination of oscillatory stability of a grid-connected PMSG wind farm based on the block diagram model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5670-5683.
- [21] 任必兴,孙蓉,李强,等. 经柔性直流入的大规模直驱风电场等效建模与小干扰稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2022,42(5):142-152.
REN Bixing, SUN Rong, LI Qiang, et al. Equivalent modeling and small-signal stability analysis on PMSG-based large-scale wind farm connected to power system via VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 142-152.
- [22] LI S. Power flow modeling to doubly-fed induction generators (DFIGs) under power regulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3292-3301.
- [23] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定控制系统技术规范:GB/T 40587—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

作者简介:



李生虎

李生虎(1974—),男,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为含风电、HVDC、FACTS电力系统的建模、分析和稳定控制(E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn);

张奥博(1998—),男,硕士研究生,研究方向为风电并网电力系统分析与控制(E-mail: 2020110390@mail.hfut.edu.cn);

夏伟健(2000—),男,硕士研究生,研究方向为风电并网电力系统分析与控制(E-mail: xwj110316@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Design and parameter setting for multi-band supplementary damping controller of system integrated DFIG

LI Shenghu^{1,2}, ZHANG Aobo^{1,2}, XIA Weijian^{1,2}, WANG Zhuang^{1,2}

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

2. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the suppression problem of multiple low-frequency oscillation(LFO) modes in doubly-fed induction generator(DFIG) integrated system, the design and parameter setting for multi-band supplementary damping controller(MBSDC) based on DFIG are proposed to improve the damping of multiple LFO modes. The state matrix of the DFIG integrated system is established. The target LFO modes to be suppressed are selected based on the eigenvalue analysis, and the MBSDC strategy is designed. Based on the linearized model of the DFIG-MBSDC system, the analytical expression of the transfer function sensitivity to corresponding suppression bands is derived, which quantifies the relationship between the multi-LFO modes and the transfer function of the MBSDC, applied for control parameter setting. The eigen-sensitivity analysis and time-domain simulative results show that the proposed DFIG-MBSDC can effectively suppress multi-LFO modes in the DFIG system. The control parameters are adjusted based on the transfer function sensitivity to improve the suppression effect for multi-LFO modes.

Key words: DFIG; wind power system; low frequency oscillation; multi-band supplementary damping controller; transfer function sensitivity

附录 A

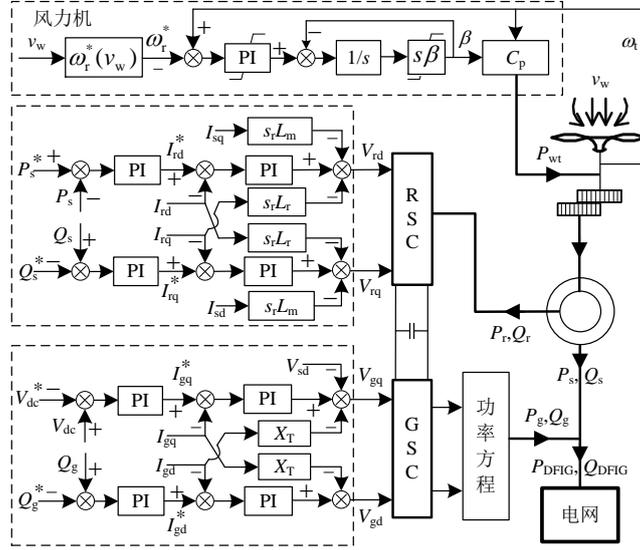


图 A1 DFIG 控制模型

Fig.A1 Control model of DFIG

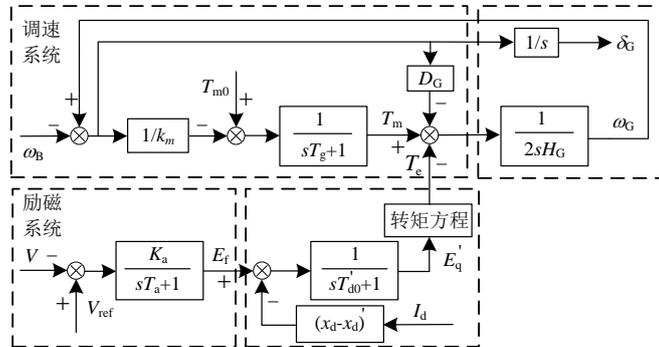


图 A2 SG 控制模型

Fig.A2 Control model of SG

附录 B

将传递函数整体看作变量带入状态方程中，状态矩阵由 A_{sys} 改写为 $A_{sys,G}$ ，并进行小扰动分析。由 $A_{sys,G}$ 及其特征值左、右特征向量，可得特征值对传递函数的灵敏度，如式(B1)所示：

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial G} = \Psi_i^T \frac{\partial A_{sys,G}}{\partial G} \Phi_i \quad (B1)$$

其中， Ψ 、 Φ 分别为左、右特征向量，上标 T 表示转置。

传递函数灵敏度求解的关键在于如何得到状态矩阵对传递函数的偏导 $\partial A_{sys,G} / \partial G$ ：

$$\frac{\partial A_{sys,G}}{\partial G} = \frac{\partial (A_G - B_G D_G^{-1} C_G)}{\partial G} = \frac{\partial A_G}{\partial G} - \frac{\partial B_G}{\partial G} D_G^{-1} C_G + B_G D_G^{-1} \frac{\partial D_G}{\partial G} D_G^{-1} C_G - B_G D_G^{-1} \frac{\partial C_G}{\partial G} \quad (B2)$$

在 DFIG 并网电力系统中，MBSDC 输入信号为 SG 和 DFIG 的转速，在系统线性化模型中通常将转速其定义为状态变量，MBSDC 的输出信号设为代数变量。因此只有在状态方程对代数变量的偏导矩阵 C 中，存在对 G 的偏导不为零的元素，则式(B2)可转化为：

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial G} = \Psi_i^T \left(-BD^{-1} \frac{\partial C}{\partial G} \right) \Phi_i \quad (B3)$$

控制通道传递函数变化量 ΔG 与控制参数 α 变化有关。 α 改变引起特征值和传递函数变化。在参数整定过程中,特征值变化量未知,因此无法得到 ΔG 的准确结果。将传递函数看作控制参数和特征值的多元函数,则 ΔG 可以表示为:

$$\Delta G \approx \Delta G(\alpha, \lambda_0) + \Delta G(\alpha_0, \lambda) \quad (B4)$$

其中, $\Delta G_i(\alpha, \lambda_{i0})$ 表示仅参数变化时传递函数的变化量; $\Delta G_i(\alpha_0, \lambda_i)$ 表示仅特征值变化时传递函数的变化量,可表示为特征值增量的线性关系。如式(B5)所示。

$$\begin{cases} \Delta G(\alpha, \lambda_0) = G(\alpha + \Delta\alpha, \lambda_0) - G(\alpha, \lambda_0) \\ \Delta G(\alpha_0, \lambda) = G'(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (B5)$$

其中, $G'(\lambda)$ 是 $G(\lambda)$ 关于特征值 λ 的偏导数。

附录 C

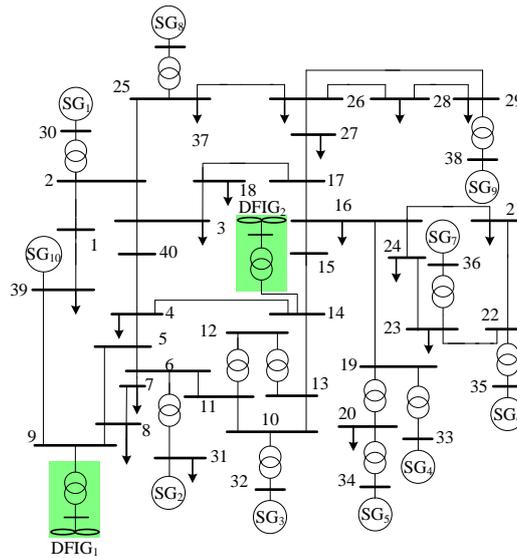


图 C1 含 DFIG 新英格兰 39 节点系统

Fig.C1 New England 39-bus test system with DFIGs

表 C1 单通道 SDC 对 LFO 模式的影响

Table C1 Influence of single-band SDC on LFO modes

模式	ξ	f/Hz	相关机组
40/41	0.032 4	1.239 4	SG ₇
42/43	0.020 2	1.212 9	SG _{1,9}
44/45	0.032 4	1.161 1	SG _{2,9}
48/49	0.023 6	1.065 1	SG ₅
50/51	0.019 7	0.974 2	SG _{2,8}
52/53	0.029 7	0.929 1	SG _{3,4}
54/55	0.038 5	0.907 5	SG _{4,6}
56/57	0.024 0	0.829 2	SG _{3,6}
58/59	0.046 6	0.840 7	SG ₉

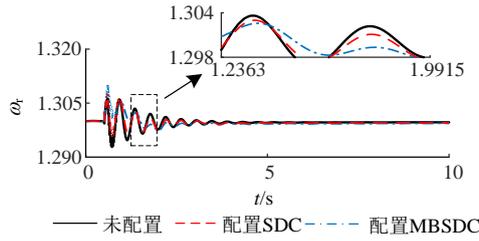


图 C2 阻尼控制对轴系振荡的影响

Fig.C2 Influence of damping control on torsional oscillation

表 C2 LFO 模式对控制通道传递函数灵敏度

Table C2 Transfer function sensitivities of LFO modes to control bands

模式	$\partial\lambda/\partial G_1$	$\partial\lambda/\partial G_2$	$\partial\lambda/\partial G_3$	$\partial\lambda/\partial G_4$
41/42	$5.58 \times 10^{-4} \pm i9.5 \times 10^{-5}$	$2.31 \times 10^{-4} \pm i1.005 \times 10^{-3}$	$-1.26 \times 10^{-4} \pm i8.69 \times 10^{-4}$	$-0.75 \times 10^{-4} \pm i8.20 \times 10^{-4}$
43/44	$3.59 \times 10^{-4} \pm i7.7 \times 10^{-5}$	$8.39 \times 10^{-4} \pm i1.19 \times 10^{-4}$	$7.05 \times 10^{-4} \pm i3.27 \times 10^{-4}$	$6.74 \times 10^{-4} \pm i7.93 \times 10^{-4}$
45/46	$1.12 \times 10^{-4} \pm i1 \times 10^{-5}$	$1.15 \times 10^{-4} \pm i9.3 \times 10^{-5}$	$5.184 \times 10^{-4} \pm i8.47 \times 10^{-4}$	$1.35 \times 10^{-4} \pm i8.44 \times 10^{-4}$
53/54	$2.50 \times 10^{-4} \pm i1.64 \times 10^{-4}$	$2.38 \times 10^{-4} \pm i1.32 \times 10^{-4}$	$2.18 \times 10^{-4} \pm i9.8 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-4} \pm i1.07 \times 10^{-4}$

表 C3 传递函数和参数变化量

Table C3 Variation of transfer function and parameters

$G(\lambda_i)$	$\Delta G(\alpha)$	$\Delta \alpha$
-0.307-i2.447	-12.09-i7.48	0.074
1.084-i8.825	2.95-i23.16	0.056
2.897-i19.273	23.20+i15.88	-0.064
5.275-i21.112	-28.91+i0.284	0.059

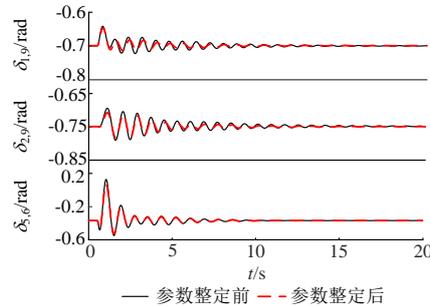


图 C3 MBSDC 参数整定对 LFO 抑制效果

Fig.C3 Damping impact of adjustment to parameters of MBSDC on LFO

表 C4 不同仿真算例下评估指标

Table C4 Evaluation index under different simulation cases

仿真算例	$\delta_{1,9}$		$\delta_{2,9}$		$\delta_{5,6}$		
	ISE	t/s	ISE	t/s	ISE	t/s	
MBSDC 并网前	0.653	>20	0.446	>20	17.586	12.87	
场景 1	整定前	0.628	15.95	0.391	18.05	17.258	11.26
	整定后	0.608	12.77	0.382	15.68	17.081	10.91
场景 2	整定前	0.640	15.87	0.427	17.45	17.413	11.54
	整定后	0.631	13.35	0.414	15.23	17.323	11.07