考虑DFIG桨距角参数优化的小干扰稳定约束最优潮流模型

李生虎,蒋以天,于新钰,张 楠,宋 宇
(合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:现有小干扰稳定约束最优潮流(SC-OPF)一般选择同步发电机(SG)有功出力作为控制参数,当某些危险特征值受SG出力影响较小时,电网稳定水平改善效果有限。基于双馈感应发电机(DFIG)详细模型,推导风电系统危险特征值对控制参数灵敏度的解析表达,利用特征值灵敏度调节控制参数,从而改进现有SC-OPF算法;同时优化SG有功出力和DFIG桨距角参数,以调整各自主导特征值。仿真结果表明,所提优化模型能够同时改善电网阻尼比和稳定裕度,并且减小经济损失。

关键词:小干扰稳定;特征值灵敏度;最优潮流;双馈感应发电机;桨距角控制;参数优化
中图分类号:TM 761 **文献标志码**:A DOI:10.16081/j.epae.201908015

0 引言

现代电力系统结构日趋复杂,随机性电源大规模并网及电网互联给系统稳定运行带来巨大挑战,其中小干扰稳定问题严重危及系统安全[1]。阻尼控制器虽能有效提高系统阻尼,但配置方案受系统运行条件变化影响,稳定问题依然存在[2]。为进一步抑制系统振荡,提高系统稳定裕度,基于发电再调度的小干扰稳定约束最优潮流(SC-OPF)受到广泛关注[3]。

传统经济调度通常利用最优潮流(OPF)获得发电机经济出力方案,但是可能降低系统稳定性[3]。为此,SC-OPF在OPF基础上加入小干扰稳定约束,对原调度方案进行再次优化,兼顾系统运行稳定性和经济性。不同文献加入该约束的方法不同。文献[4]直接将特征值实部上限作为稳定约束,采用内点法求解OPF模型时需要特征值的一阶和二阶灵敏度信息,计算过程复杂。文献[5]采用非线性半定规划模型表示特征值约束,但存在计算量较大的缺点。为简化优化过程,文献[6-7]基于特征值对控制参数的一阶灵敏度将稳定约束线性化,进而线性调整发电机出力,但是通过参数摄动得到灵敏度,计算效率不高。文献[2,8]推导了特征值一阶灵敏度的解析表达,以获取灵敏度的精确信息。上述文献主要通过调整发电机出力或负荷等运行参数增大阻尼比或驱动临界特征值左移,但如果某些危险特征值不受上述运行参数主导,参数变化对特征值影响会很小,稳定性提高效果有限。如果能同时考虑更多类型的可控参数,针对各自主导特征值进行调整,则可以进一步改善系统稳定性。

随着风电渗透率的增加,风电机组与常规发电机组的协同运行进一步增加了发电调度[9-10]和稳定性分析[11-12]的复杂性,但现有研究SC-OPF的文献很少计及风电。文献[13]对不同风电渗透率下的常规机组出力和负荷减载量进行优化。文献[14]将风力发电成本纳入目标函数,采用智能算法求解模型。上述文献更多关注风电功率对系统稳定性的影响,而没有考虑风电机组的具体结构和控制策略,也没有进一步研究优化控制参数对稳定性的改善效果。

为使风电机组提供更多辅助服务需引入附加控制,而控制策略和控制参数的选择进一步影响了系统稳定性[15-18]。可以为双馈感应发电机(DFIG)引入虚拟惯量控制或桨距角控制进而使其参与调频。前者通过释放转子动能增大DFIG输出功率以响应频率变化,但在较高风速下,DFIG以恒转速或恒功率方式运行,转子转速调节有限,此时需调节桨距角限制DFIG自身出力,以使其预留一定备用容量参与调频。现有研究桨距角控制的文献很少涉及比例–积分(PI)控制器PI系数的整定,文献[17-18]表明,桨距角PI参数选择不当会影响DFIG的频率控制效果,甚至造成稳定性的降低。因此,有必要在引入桨距角控制的DFIG风电系统SC-OPF中,计及PI参数的优化。

针对上述问题,本文改进SC-OPF模型,同时优化同步发电机(SG)出力和DFIG桨距角PI参数,以调整各自主导特征值。取目标函数为参数调节量之和最小,将稳定性提升对系统当前运行点的影响降至最低。基于DFIG详细模型,推导风电系统特征值对控制参数灵敏度的解析表达,以调节控制参数。采用内点法求解优化模型。新英格兰39节点系统结果表明,所提模型能有效增大系统弱阻尼比和驱动临界特征值左移,并避免损失过多经济性。

1 桨距角控制模型及其对小干扰稳定影响

1.1 DFIG桨距角控制模型

图1给出含桨距角控制器[18]的DFIG拓扑结构。

收稿日期:2019-04-10;修回日期:2019-06-11
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)

桨距角控制方程见附录A。

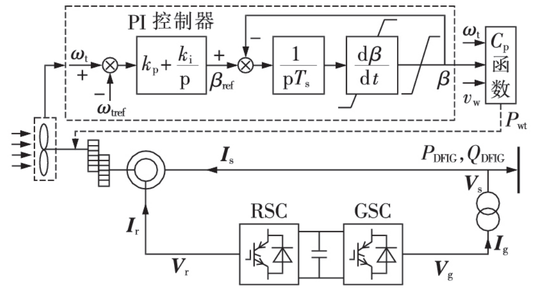

图1　DFIG及桨距角控制器结构

Fig.1　Configuration of DFIG and pitch angle controller

图中,$\boldsymbol{V}_s$、$\boldsymbol{V}_r$和$\boldsymbol{V}_g$分别为DFIG定子、转子和网侧变流器节点电压,$\boldsymbol{I}_s$、$\boldsymbol{I}_r$和$\boldsymbol{I}_g$分别为对应的电流;P_{DFIG}和Q_{DFIG}分别为DFIG输出有功和无功功率;P_{wt}为风力机捕获功率;v_w为风速;ω_t和β分别为风力机转子转速和桨距角;ω_{tref}和β_{ref}为参考值;T_s为伺服时间常数;p为微分算子;C_p为风能利用系数;k_p和k_i分别为PI控制器的比例和积分系数。控制器的作用是跟踪ω_t变化,即ω_t高于ω_{tref}时产生的偏差量通过PI控制得到β_{ref},进而驱动伺服系统增大β,使风力机减速,降低P_{wt}。

1.2　桨距角控制对小干扰稳定性影响

引入桨距角控制可以使风电机组功率输出平稳,有利于调频过程中风电系统的稳定运行。现有研究多通过改进控制策略,以进一步改善系统小干扰稳定性,如引入系统频率偏差输入,调节桨距角使风电机组输出阻尼功率,从而抑制功率振荡[19],但较少涉及桨距角控制参数优化对稳定性的改善效果。文献[17-18]通过合理选择桨距角PI参数改善系统阻尼,但是通过改变PI参数观察特征值变化趋势不能保证参数取值最优,且取值方案受风速变化等因素影响,增加了参数选择的复杂性。

因此,本文在SC-OPF模型中考虑桨距角PI参数的优化,推导风电系统特征值对PI参数灵敏度的解析表达,以求取不同风速下PI参数的取值方案。由于低风速下不涉及桨距角控制,本文主要优化中高风速下的PI参数。

2　考虑桨距角参数优化的SC-OPF模型

2.1　小干扰稳定指标选择及其线性化

DFIG微分-代数方程具体参考文献[20-21]。SG采用实用三阶模型,负荷采用恒阻抗模型。线性化方程组后,得到计及DFIG详细模型的风电系统状态矩阵$\boldsymbol{A}_{sys}$。整个系统共有68个状态变量和326个代数变量。

为避免弱阻尼引起低频振荡,$\boldsymbol{A}_{sys}$的特征值$\lambda=\sigma+\mathrm{j}\omega$对应阻尼比$\zeta=-\sigma/\sqrt{\sigma^2+\omega^2}$必须大于门槛值(本文设为0.05[3]);同时$\sigma$绝对值不能过小,否则可能诱导系统失稳[5],即$\zeta$越大,$\lambda$越远离虚轴,系统趋于稳定的速度越快,稳定裕度越大[5,12]。因此本文同时采用2种指标[2-8]衡量系统整体稳定性:

$$\begin{cases}\zeta \geqslant \zeta^{\min} \\ \sigma \leqslant \sigma^{\max}\end{cases} \tag{1}$$

其中,$\zeta^{\min}$为阻尼比下限;$\sigma^{\max}$为特征值实部上限。

直接将式(1)作为OPF的不等式约束,采用内点法求解模型时,海森矩阵需要二阶灵敏度信息[4],如果控制参数类型增多,灵敏度的求取过程更加复杂。关于SC-OPF的文献大多基于特征值一阶灵敏度将式(1)线性化[2-3,6-8],得到新的小干扰稳定不等式约束:

$$\begin{cases}\zeta(\alpha^0)+\sum\left[\dfrac{\partial\zeta(\alpha^0)}{\partial\alpha^0}\Delta\alpha\right]\geqslant\zeta^{\min} \\ \sigma(\alpha^0)+\sum\left[\dfrac{\partial\sigma(\alpha^0)}{\partial\alpha^0}\Delta\alpha\right]\leqslant\sigma^{\max}\end{cases} \tag{2}$$

其中,上标“0”表示初始值;Δ表示控制参数相对初值的变化量;$\partial\zeta/\partial\alpha$和$\partial\sigma/\partial\alpha$分别为$\zeta$和$\sigma$对可控参数$\alpha$的灵敏度。第一个不等式含义是参数变化量$\Delta\alpha=\alpha-\alpha^0$与对应$\partial\zeta/\partial\alpha$乘积之和近似为$\zeta$的变化总量,优化后$\zeta$应不小于设定下限$\zeta^{\min}$。同理,优化后$\sigma$应不大于$\sigma^{\max}$。这里将优化前初始运行点的特征值灵敏度始终作为约束线性化中的梯度,优化时无需重复计算灵敏度[2,8]。

式(2)所示的稳定约束也是SC-OPF与传统静态OPF的区别之处,前者利用特征值灵敏度在小干扰约束与OPF之间建立联系,线性化后的小干扰约束可以保证优化后的参数取值方案在满足OPF目标函数的同时,达到设定的稳定指标要求。

2.2　考虑桨距角PI参数优化的SC-OPF模型

引入桨距角控制后,$\boldsymbol{A}_{sys}$的某些与PI参数强相关的特征值可能不受SG有功出力P_G的控制。考虑到风电系统危险模型类型很多,以下选取较为典型的2种:阻尼比小于0.05或实部很小的特征值,本文同时优化P_G、k_p和k_i,对各自主导特征值进行调整。

(1)目标函数。

以P_G、k_p和k_i三者调节量绝对值之和最小作为目标函数。最小化参数调节量[8,22]避免了优化方案过多偏离系统当前稳定运行点,减少控制代价。

$$\min\ F=w_G\sum_{j=1}^{N_G}\left|\Delta P_{Gj}\right|+w_p\sum_{n=1}^{N_D}\left|\Delta k_{pn}\right|+w_i\sum_{n=1}^{N_D}\left|\Delta k_{in}\right| \tag{3}$$

其中,Δ表示变化量,P_{Gj}为第j台SG有功出力,k_{pn}和k_{in}为第n台DFIG的PI参数;N_G和N_D分别为SG和DFIG台数;w_G、w_p和w_i为参数对应的权重系数,其取值应保证不同优化目标的数量级接近[23]。具体权重系数取值方案在3.1节算例中予以分析。

(2)等式及不等式约束。

系统节点i的等式约束为：

$$\begin{cases}\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - P_i = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i = 0\end{cases} \tag{4}$$

其中，ΔP_i、P_{Li}和P_i分别为节点i的有功增量、负荷有功和注入有功；ΔQ_i、Q_{Gi}、Q_{Li}和Q_i分别为节点i的无功增量、无功出力、负荷无功和注入有功。引入DFIG内部等式约束，与系统潮流联立求解，具体方程见文献[21]。

SG出力的不等式约束为：

$$\begin{cases}P_{Gj}^{\min} \leqslant P_{Gj} \leqslant P_{Gj}^{\max} \\ Q_{Gj}^{\min} \leqslant Q_{Gj} \leqslant Q_{Gj}^{\max}\end{cases} \tag{5}$$

其中，上标max和min分别表示变量上、下限。系统节点和DFIG内部节点的电压幅值和相角约束以及线路传输功率约束这里不再赘述。

（3）新增小干扰稳定相关不等式约束。

根据可控参数类型将式（2）具体写成式（6）形式。PI参数主导的特征值对P_G的灵敏度可能很小甚至可以忽略不计，P_G主导的特征值对PI参数的灵敏度亦然，这一点在算例中验证。

$$\begin{cases}\zeta^0 + \sum\limits_{j=1}^{N_G}\left(\dfrac{\partial \zeta^0}{\partial P_{Gj}^0}\Delta P_{Gj}\right) + \sum\limits_{n=1}^{N_D}\left(\dfrac{\partial \zeta^0}{\partial k_{pn}^0}\Delta k_{pn} + \dfrac{\partial \zeta^0}{\partial k_{in}^0}\Delta k_{in}\right) \geqslant \zeta^{\min} \\ \sigma^0 + \sum\limits_{j=1}^{N_G}\left(\dfrac{\partial \sigma^0}{\partial P_{Gj}^0}\Delta P_{Gj}\right) + \sum\limits_{n=1}^{N_D}\left(\dfrac{\partial \sigma^0}{\partial k_{pn}^0}\Delta k_{pn} + \dfrac{\partial \sigma^0}{\partial k_{in}^0}\Delta k_{in}\right) \leqslant \sigma^{\max}\end{cases} \tag{6}$$

式（7）对参数调节范围进行约束，防止灵敏度较大但发电成本较高的SG调节量过多而损失更多经济性。这里不计PI参数调节的经济代价。

$$\begin{cases}P_{Gj}^{\min 2} \leqslant P_{Gj} \leqslant P_{Gj}^{\max 2} \\ k_{pn}^{\min} \leqslant k_{pn} \leqslant k_{pn}^{\max} \\ k_{in}^{\min} \leqslant k_{in} \leqslant k_{in}^{\max}\end{cases} \tag{7}$$

其中，上标max2和min2分别表示P_G再调节范围的上、下限，它同样要满足式（5）中的有功出力约束。

2.3　模型初值计算及算法流程

（1）运行参数初值。

进行SC-OPF计算之前，需要求取系统运行参数（如功率和电压）初值，本文通过1次DFIG风电系统常规OPF得到该初值，目标函数为SG最小发电费用[2]。2.2节中等式约束不变，不计式（6）和式（7）的小干扰稳定相关约束，目的是确保初始运行点的经济性，并在此基础上尽可能少地调节P_G。

（2）特征值一阶灵敏度初值。

文献[6-7]计算$\partial\lambda/\partial P_G$时，是通过小幅调整$\alpha$，将两者变化量比值$\Delta\lambda/\Delta\alpha$近似为一阶灵敏度，计算效率和结果准确性有限。求取$\partial\lambda/\partial P_G$的难点是$P_G$往往隐含在$\boldsymbol{A}_{sys}$一些元素（如电压、电流、电势、功角等）中，不能直接求取灵敏度[24]；计及DFIG详细模型后，还需考虑P_G变化对DFIG内部运行参数影响。因此，需要解析表达$\partial\lambda/\partial P_G$。文献[2,8,24]利用解析法计算$\partial\lambda/\partial\alpha$，本文参考该思路，并基于DFIG详细模型[21]，进一步推导风电系统$\partial\lambda/\partial\alpha$的解析表达。

对含DFIG潮流雅可比矩阵[21]求逆后得到节点电压幅值V和相角θ对P_G的灵敏度，由于$\boldsymbol{A}_{sys}$中受P_G影响的元素可以用节点电压及导纳矩阵描述，所以将$\partial V/\partial P_G$和$\partial\theta/\partial P_G$作为中间量，可间接求取$\partial\lambda/\partial P_G$。桨距角PI参数变化不影响系统运行参数，并且出现在$\boldsymbol{A}_{sys}$元素表达式中，其对应灵敏度可直接求取。$\partial\lambda/\partial\alpha$和$\partial\zeta/\partial\alpha$推导见附录A中式（A7）—（A13）。

（3）算法流程。

算法流程如图2所示。模型采用内点法求解，目标函数中的绝对值项采用凝聚函数[23]光滑化处理。优化结束后，需重新计算特征值并校验设定的稳定指标。通常1次SC-OPF优化过程即可满足指标要求，如果不满足，是因为参数调节量较大，线性化约束式（6）时有一定的误差。此时应再次进行优化，且程序中需在原稳定指标的基础上添加一个合适的修正量[2]（本文设为0.001），直到最终优化结果能够满足原稳定指标为止。通常1~3次修正过程后即可满足要求。

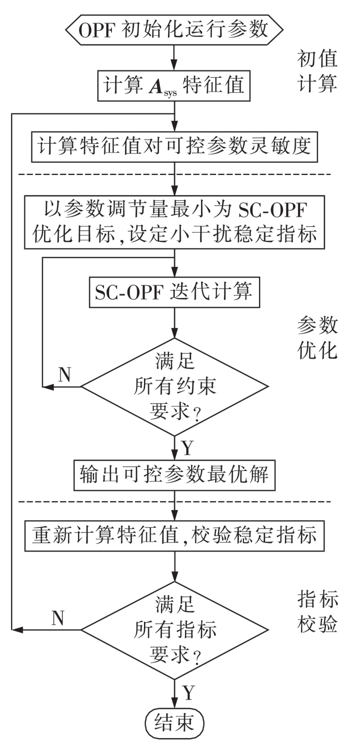

图2　基于特征值灵敏度的SC-OPF算法流程

Fig.2　Flowchart of SC-OPF algorithm based on eigenvalue sensitivity

3　算例分析

算例采用图3所示的新英格兰39节点系统，基准功率S_B=100 MW，SG发电费用系数见文献[25]。

含 50 台 2 MW DFIG 的风电场等效成单台机组，经变压器升压后接到节点 9 上。DFIG 原始参数见文献[21]。桨距角 PI 参数 k_p 和 k_i 的初值分别取 0.95 和 5×10^{-4} p.u.。$N_G=10$，$N_D=1$。首先以中风速 $v_w=9$ m / s 为例，根据常规 OPF 计算得到 P_G 初始值。由于节点 39 为平衡节点，因此 P_{G1}—P_{G9} 为控制参数。

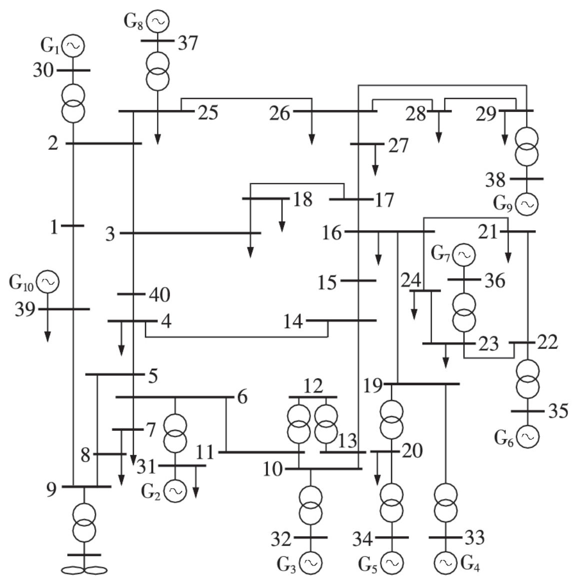

图3　含DFIG的新英格兰39节点测试系统

Fig.3　New England 39-bus test system with DFIG

设定阻尼比安全值为 $\zeta^{\min}=0.05$，$\sigma^{\max}$ 没有固定安全范围，但其应尽量远离虚轴。经特征值分析后发现，$\boldsymbol{A}_{\mathrm{sys}}$ 特征值均位于虚轴左侧，其中有 2 对特征值阻尼比小于 0.05，即 $\zeta_{23,24}=0.046\,4$，$\zeta_{25,26}=0.049$，为机电振荡模式，易引发电网低频振荡；有 1 个最靠近虚轴的临界特征值（虚部为 0 的实特征值），即 $\sigma_{58}=-5.086\,4\times10^{-4}$，为 DFIG 衰减模式，易导致风电系统小扰动后衰减过程缓慢。具体的特征值频率及强相关变量在附录 B 中给出。这 3 个危险特征值的存在说明传统经济调度方案并不能保证系统的小干扰稳定性，它们也是本文的优化目标。给出弱阻尼 $\zeta_{23,24}$ 和 $\zeta_{25,26}$ 以及临界特征值 σ_{58} 对控制参数的部分灵敏度信息如表 1 所示，表中粗体数据为三者对各自主导控制参数的灵敏度。可以看出危险特征值对其非主导参数的灵敏度均在 10^{-9} 以下，单独调节 P_G 很难改善临界特征值 σ_{58}，同理，单独调节 PI 参数也很难改善弱阻尼 $\zeta_{23,24}$ 和 $\zeta_{25,26}$。因此，需要同时优化 P_G 和 PI 参数，在两者的配合下增大弱阻尼，同时驱动临界特征值左移，从而抑制系统振荡并提高系统稳定裕度。

表 1　弱阻尼和临界特征值对主导、非主导参数灵敏度

Table 1　Sensitivities of weak damping ratio and critical eigenvalue to dominant and non-dominant parameters

α	$\partial\zeta_{23,24}/\partial\alpha$	$\partial\zeta_{25,26}/\partial\alpha$	$\partial\sigma_{58}/\partial\alpha$
P_{G4}	**0.001 3**	**-1.892×10^{-4}**	-1.953×10^{-9}
P_{G5}	**$-0.004\,6$**	**-3.912×10^{-4}**	-1.953×10^{-9}
P_{G6}	**-2.355×10^{-4}**	**$-8.375\,5\times10^{-4}$**	-1.906×10^{-9}
P_{G7}	**$-0.001\,5$**	**$-0.003\,8$**	-1.890×10^{-9}
k_p	-7.111×10^{-11}	-2.788×10^{-11}	**$5.177\,4\times10^{-4}$**
k_i	1.388×10^{-12}	3.239×10^{-12}	**$-1.017\,9$**

为验证灵敏度的准确性，图 4 给出 P_{G5} 逐渐增加 0.5 p.u. 对应的 $\zeta_{23,24}$ 实际变化曲线，以及 P_{G5} 增加 0.25 p.u. 时对应的灵敏度斜线，图中 P_{G5} 为标幺值。图 5 给出 k_p 逐渐减少 0.35 对应的 σ_{58} 变化曲线，以及当 k_p 减少 0.2 时对应的灵敏度斜线。可见，两图中灵敏度斜线与实际变化曲线在对应点处都是相切的，其余 P_G 及 k_i 也有相同结论，说明了所推导灵敏度解析表达的准确性。

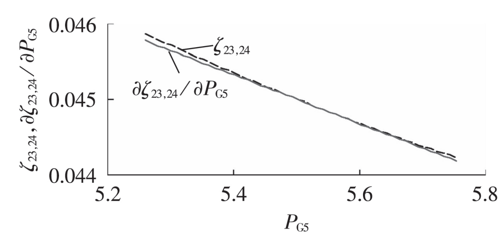

图 4　灵敏度 $\partial\zeta_{23,24}/\partial P_{G5}$ 与阻尼比 $\zeta_{23,24}$ 实际曲线对比

Fig.4　Comparison of $\partial\zeta_{23,24}/\partial P_{G5}$ and actual curve of $\zeta_{23,24}$

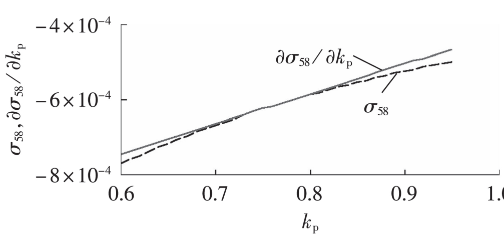

图 5　灵敏度 $\partial\sigma_{58}/\partial k_p$ 与特征值 σ_{58} 实际曲线对比

Fig.5　Comparison of $\partial\sigma_{58}/\partial k_p$ and actual curve of σ_{58}

3.1　小干扰稳定指标对优化结果的影响

取 $v_w=9$ m / s，$w_G=1/P^0_{G39}$，$w_p=1/k^0_p$，$w_i=1/k^0_i$，权重系数取参数初值的倒数（w_G 以平衡节点 SG 有功 P^0_{G39} 为基准），目的是将变化量等效为比例以使优化参数的数量级接近。由于 P_G 与 PI 参数主导的特征值不同，w_G 与 w_p 或 w_i 之间的影响可忽略不计，即 w_G 取值不会影响 PI 参数的优化结果，同理，w_p 和 w_i 的取值也不会影响 P_G 的优化结果。但 w_p 和 w_i 取值影响 k_p 和 k_i 优化结果，因为两者主导同一特征值。以各参数自身初值为基准，设定 P_G 调节范围为 ±20%，PI 参数则为 ±50%。表 2 和表 3 分别给出小干扰稳定指标 $\zeta^{\min}$ 和 $\sigma^{\max}$ 不同时对应的参数优化结果，两表中第一行数据对应初始值，表中 P_{G4}—P_{G7}、k_i 为标幺值。

表 2 中，设定 $\zeta^{\min}=0.05$，结合表 1 中的灵敏度信

表2 不同ζ^{min}对应的优化结果

Table 2 Optimization results for different values of ζ^{min}

ζ^{min}	$\zeta_{23,24}$, $\zeta_{25,26}$	P_{G4}	P_{G5}	P_{G6}	P_{G7}	总发电 费用／$
—	0.0464, 0.0490	3.430	5.041	6.284	4.826	1.570×10^5
0.050	0.0505, 0.0500	4.116	4.514	6.291	4.559	1.577×10^5
0.054	0.0608, 0.0550	4.116	4.038	5.549	3.860	1.696×10^5

表3 不同σ^{max}对应的优化结果

Table 3 Optimization results for different values of σ^{max}

σ^{max}	σ_{58}	k_p	k_i
—	-5.0864×10^{-4}	0.950	5.000×10^{-4}
-7.5×10^{-4}	-7.5006×10^{-4}	0.950	7.429×10^{-4}
-10^{-3}	-1.4569×10^{-3}	0.475	7.500×10^{-4}

息，由于P_{G5}和P_{G7}对应的$\partial\zeta/\partial P_G$较大且为负，两者优先减小，与其灵敏度符号相反的$P_{G4}$增大并达到20%再调节上限，灵敏度较小的$P_{G6}$变化很小，也说明优先调节灵敏度较大的$P_G$保证了调节量之和最小，改善阻尼比的效率最高。优化后$\zeta_{23,24}$和$\zeta_{25,26}$均达到了安全要求，由于与$\zeta_{23,24}$强相关的P_G较多，其增量要大于$\zeta_{25,26}$。为进一步增大弱阻尼，设定$\zeta^{min}=0.054$，P_{G4}、P_{G5}和P_{G7}均达到了20%再调节限制，灵敏度较小的P_{G6}也明显减少。此时，$\zeta_{23,24}$和$\zeta_{25,26}$分别增加到0.0608和0.0550，系统小干扰稳定性提高。

ζ^{min}增加也使得SG的发电费用增加。从表2可知，$\zeta^{min}=0.054$时对应的发电费用为$\$1.696\times10^5$，比初始点的最优值增加了$\$1.26\times10^4$，由于优化方案会偏离系统初始经济运行点，因此稳定性的提升需要牺牲经济性，且提升越多，经济损失越大。最小化调节量得到的方案对系统当前运行点的影响最小，但该方案不能保证损失的经济性最少。例如发电费用系数较低的P_{G5}和P_{G7}优先减少，导致费用系数较高的P_{G1}和P_{G2}增加，如果不限制其再调节量，P_{G5}和P_{G7}会进一步减少，使得总发电费用增加。因此，本文将P_G再调节范围限制在20%内，也避免了稳定性提升造成过多的经济损失。

表3中，随着σ^{max}设定值的减小，k_p减小而k_i增加（两者灵敏度符号相反）。当$\sigma^{max}=-10^{-3}$时，k_p和k_i达到50%调节上限，特征值σ_{58}向左移动到距离虚轴1.4569×10^{-3}处，弥补了单独调节P_G难以改善临界特征值的不足，进一步提高了系统稳定裕度。$\sigma^{max}=-7.5\times10^{-4}$时，$k_p$不变而$k_i$增加50%左右，说明$\sigma_{58}$对$k_i$的灵敏度相对较大（基于PI参数自身数值），这一点在3.2节通过设定不同权重系数进一步分析。

3.2 权重系数对PI参数优化的影响

设置4种方案：方案1，PI参数初值；方案2，PI参数调节比例（权重系数已将调节量等效为调节比例）之和最小，即$w_p=1/k_p^0$，$w_i=1/k_i^0$；方案3，k_i调节比例最小，即$w_p=0$，$w_i=1/k_i^0$；方案4，k_p调节比例最小，即$w_p=1/k_p^0$、$w_i=0$。后3种方案以表3中$\sigma^{max}=-7.5\times10^{-4}$的情况为例。不同权重系数对应的PI参数优化结果如图6所示，图中k_i为标幺值。

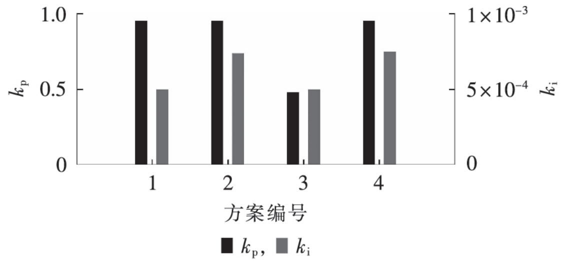

图6 不同权重系数对k_p和k_i优化结果的影响

Fig.6 Impact of different weight coefficients on optimization results of k_p and k_i

方案2中k_i增加48.5817%，PI参数总调节比例为48.5817%；方案3中总调节比例为50.636%；方案4中总调节比例为49.1232%。可见，方案3和4的PI参数调节比例均大于方案2。即单独优化某一个PI参数，其自身调节比例最小，但不能保证两者的调节比例之和最小；同时优化k_p和k_i，灵敏度相对较大的参数会优先调节（本文应优先调节k_i），以最小的调节代价驱动临界特征值左移。

3.3 风速变化对优化结果的影响

设定ζ^{min}使优化后弱阻尼改善效果最好（即P_G均达到或接近±20%调节限制，且优化程序收敛），表4给出了不同风速下P_G优化后的结果，表中P_{G4}—P_{G7}为标幺值。图7则给出了$\zeta_{23,24}$和$\zeta_{25,26}$在优化前后随风速上升的变化曲线。图7(a)中，风速增加对$\zeta_{23,24}$的影响很小，优化模型使其从0.0464左右增加到0.055左右；图7(b)中，风速增加会使$\zeta_{25,26}$从0.049逐渐增加到0.052，在$v_w=13$ m／s时，虽然优化后$\zeta_{25,26}$没有提高，但其已经在安全范围内。当$v_w\geqslant13$ m／s时，风机恒功率运行，风速变化不再影响P_G以及$\zeta_{23,24}$和$\zeta_{25,26}$。值得注意的是，当风速上升至13 m／s时，阻尼比$\zeta_{23,24}$会从0.0531逐渐减小到0.05成为最小阻尼比，由表1知，这是DFIG的定子模式，其衰减频率很大，在51 Hz左右，即使该阻尼比处于安全界限，也不会导致低频振荡的发生。因此，在各风速下，优

表4 不同风速对P_G优化结果的影响

Table 4 Impact of different wind speeds on optimization results of P_G

v_w／(m·s^{-1})	P_{G4}	P_{G5}	P_{G6}	P_{G7}
10	4.104	4.070	6.207	3.849
11	4.081	4.007	6.044	3.835
12	4.091	4.163	5.997	3.819
13	4.204	4.217	6.570	3.963
14	4.204	4.217	6.570	3.963

化模型都能有效增大系统弱阻尼至安全范围内。

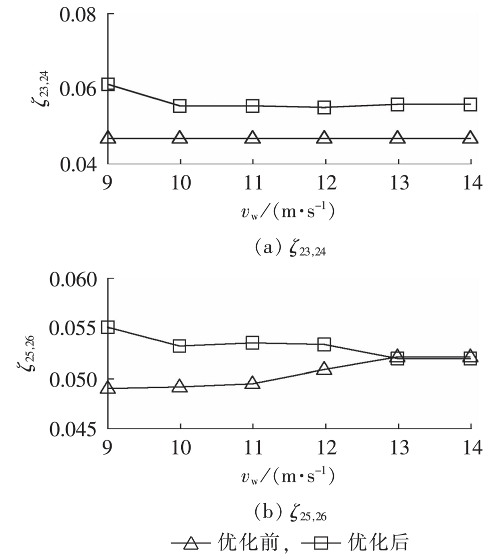

图7　不同风速下优化前、后的阻尼比

Fig.7　Damping ratios before and after optimization for different wind speeds

图8给出σ_{58}的初值及PI参数调节50%后σ_{58}的优化值。可以看出，随着风速上升，临界特征值σ_{58}减小，但变化幅度不大。高风速下优化PI参数依然可以有效驱动临界特征值左移。

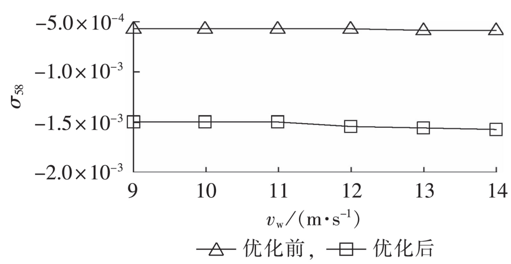

图8　不同风速下优化前、后的临界特征值

Fig.8　Critical eigenvalues before and after optimization for different wind speeds

4　结论

本文在SC-OPF模型中同时优化SG有功出力和DFIG桨距角PI参数，弥补单独调节前者无法改善其非主导特征值的不足。推导了DFIG风电系统特征值对控制参数一阶灵敏度的解析表达。得到如下结论：

（1）中高风速下SC-OPF模型能有效改善系统弱阻尼至安全范围内，同时驱动临界特征值左移，从而抑制低频振荡，提高系统稳定裕度；

（2）最小化参数调节量需优先调节灵敏度大的控制参数，其对应调节方案虽不能保证以最小的经济代价提升系统稳定性，但能将稳定性提升对系统当前运行点的影响降至最低，同时避免损失过多经济性。

附录见本刊网络版（http：//www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 秦超，曾沅，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 Equip-ment，2017，37(5)：100-106.

[2] 孙元章，肖峰. 考虑小干扰稳定约束的最优潮流求解[J]. 高电压技术，2008，34(11)：2270-2275.
SUN Yuanzhang，XIAO Feng. Computation of optimal power flow with small signal stability constraints[J]. High Voltage Engineering，2008，34(11)：2270-2275.

[3] 邢洁，陈陈，武鹏. 考虑小干扰稳定约束的有功优化调度[J]. 电力系统自动化，2010，34(12)：24-28.
XING Jie，CHEN Chen，WU Peng. Optimal active power dispatch with small-signal stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems，2010，34(12)：24-28.

[4] CONDREN J，GEDRA T W. Expected-security-cost optimal power flow with small-signal stability constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2006，21(4)：1736-1743.

[5] 李佩杰，韦化，白晓清. 小干扰稳定约束最优潮流的非线性半定规划方法[J]. 中国电机工程学报，2013，33(7)：69-76.
LI Peijie，WEI Hua，BAI Xiaoqing. Small-signal stability constrained optimal power flow based on NLSDP[J]. Proceedings of the CSEE，2013，33(7)：69-76.

[6] ZARATE-MINANO R，MILANO F，CONEJO A J. An OPF methodology to ensure small-signal stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2011，26(3)：1050-1061.

[7] SARIC A T，STANKOVIC A M. Rapid small-signal stability assessment and enhancement following changes in topology[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2015，30(3)：1155-1163.

[8] LI C，CHIANG H D，DU Z. Network-preserving sensitivity-based generation rescheduling for suppressing power system oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2017，32(5)：3824-3832.

[9] 徐箭，洪敏，孙元章，等. 基于经验Copula函数的多风电场出力动态场景生成方法及其在机组组合中的应用[J]. 电力自动化设备，2017，37(8)：81-89.
XU Jian，HONG Min，SUN Yuanzhang，et al. Dynamic scenario generation based on empirical Copula function for outputs of multiple wind farms and its application in unit commitment[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(8)：81-89.

[10] 黄松柏. 考虑风电机无功调节能力的配电网有功/无功联合调度[J]. 电力自动化设备，2017，37(2)：44-49.
HUANG Songbai. Coordinated active/reactive power dispatch considering reactive-power regulation capability of wind turbine for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(2)：44-49.

[11] 马静，高翔，李益楠，等. 考虑风速随机特征的多工况电力系统稳定性分析[J]. 电力自动化设备，2016，36(8)：26-32.
MA Jing，GAO Xiang，LI Yinan，et al. Stability analysis considering time-varying wind speed for power system with multiple operating conditions[J]. Electric Power Automation Equipment，2016，36(8)：26-32.

[12] 许伯强，张舒怡. 定子故障下的双馈风力发电机组建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备，2016，36(9)：93-99.
XU Boqiang，ZHANG Shuyi. Modeling and stability analysis of DFIG with stator fault[J]. Electric Power Automation Equipment，2016，36(9)：93-99.

[13] CAO J,DU W,WANG H F,et al. Optimal corrective control for the stability enhancement of power systems considering wind penetration[C]//IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011). Edinburgh,UK:IEEE,2011:1-6.
[14] SHI L,WANG C,YAO L,et al. Optimal power flow solution incor-porating wind power[J]. IEEE Systems Journal,2012,6(2):233-241.
[15] 王磊,贾宏杰. 无功协调控制策略对风电场并网系统小扰动稳定性的影响[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):28-33.
WANG Lei,JIA Hongjie. Impact of coordinated var control on small signal stability of power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):28-33.
[16] 马燕峰,刘会强,俞人楠. 风电场中STATCOM抑制系统功率振荡[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):67-73.
MA Yanfeng,LIU Huiqiang,YU Rennan. Power oscillation suppression based on STATCOM in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):67-73.
[17] 赵晶晶,洪婉莎,徐成斯,等. 基于特征值分析的DFIG风电机组在微电网中的频率控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(19):5613-5621.
ZHAO Jingjing,HONG Wansha,XU Chengsi,et al. Control strategy of DFIG wind power generation on frequency control of micro-grid based on eigenvalue analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(19):5613-5621.
[18] 李生虎,朱国伟. 基于特征结构分析的风电机组调频控制桨距角参数选择[J]. 太阳能学报,2017,38(3):662-668.
LI Shenghu,ZHU Guowei. Pitch angle adjustment to wind turbine generators for frequency regulation based on eigenvalue analysis[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2017,38(3):662-668.
[19] 关宏亮,迟永宁,戴慧珠,等. 异步风电机组接入系统的小干扰稳定及控制[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):54-58.
GUAN Hongliang,CHI Yongning,DAI Huizhu,et al. Small signal stability and control of wind turbine with asynchronous generator integration into power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(4):54-58.
[20] YANG L,XU Z,ØSTERGAARD J,et al. Oscillatory stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26(1):328-339.
[21] 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.
[22] 顾伟,蒋平,唐国庆. 提高电力系统小扰动稳定性的最优分岔控制策略[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):29-33.
GU Wei,JIANG Ping,TANG Guoqing. Optimal bifurcation control to improve small-signal stability of power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):29-33.
[23] 李生虎,张维,吴正阳,等. 双馈感应发电机参与调频的概率最优潮流模型[J]. 电力系统自动化,2017,41(23):46-52.
LI Shenghu,ZHANG Wei,WU Zhengyang,et al. Probabilistic optimal power flow model considering doubly-fed induction generators participating in frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(23):46-52.
[24] 陈中. 电力系统小干扰稳定实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):42-46.
CHEN Zhong. Real-time stability control of power system with small disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):42-46.
[25] ONGSAKUL W,PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(1):620-628.

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,主要研究方向为风电系统分析与控制、电力系统规划与可靠性、柔性输电技术(**E-mail**:shenghuli@hfut.edu.cn);
蒋以天(1994—),男,安徽蒙城人,硕士研究生,研究方向为风电系统安全经济运行与稳定性(**E-mail**:jiangyitian@mail.hfut.edu.cn);
于新钰(1996—),女,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为风电系统分析与控制、电力系统规划与可靠性(**E-mail**:2018110351@mail.hfut.edu.cn)。

Small-signal stability constrained optimal power flow model considering optimization of DFIG pitch angle

LI Shenghu,JIANG Yitian,YU Xinyu,ZHANG Nan,SONG Yu
(School of Electrical Engineering and Automation,Hefei University of Technology,Hefei 230009,China)

Abstract:The existing SC-OPF(Small-signal stability Constrained Optimal Power Flow) generally selects the active output of SG(Synchronous Generator) as the control parameter,and the improvement effect of power system stability level is limited when SG output has little influence on some dangerous eigenvalues. Based on the detailed model of DFIG,the analytical expression of the sensitivity of the dangerous eigenvalues to the control parameters is derived,and the control parameters are adjusted by the eigenvalue sensitivities to improve the existing SC-OPF algorithm. Meanwhile,the active output of SG and pitch angle parameter of DFIG are optimized to adjust the dominant eigenvalues. Simulative results show that the proposed model can improve both the damping ratio and stability margin of power system and reduce the economic loss.

Key words:small-signal stability;eigenvalue sensitivity;optimal power flow;doubly-fed induction generator;pitch angle control;parameter optimization

附录 A

A1 DFIG 桨距角控制及转子运动方程

结合图 1，给出 DFIG 桨距角控制的微分方程：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}(\beta_{\mathrm{ref}}-k_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{t}})}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{i}}(\omega_{\mathrm{t}}-\omega_{\mathrm{tref}})\\ \dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\beta_{\mathrm{ref}}-\beta}{T_{\mathrm{s}}}\end{cases} \tag{A1}$$

风力机转子运动的微分方程为：

$$\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}t}=\frac{P_{\mathrm{wt}}/\omega_{\mathrm{t}}-K\gamma-D(\omega_{\mathrm{t}}-\omega_{\mathrm{r}})}{2H_{\mathrm{t}}} \tag{A2}$$

其中，K 为低速轴刚度系数；γ 为轴系扭转角；D 为等效阻尼系数；ω_{r} 为 DFIG 转子转速；H_{t} 为风力机惯性时间常数。P_{wt}(有名值)的表达式为：

$$\begin{cases}P_{\mathrm{wt}}=\dfrac{\rho A v_{\mathrm{w}}^{3}}{2}c_1\left(\dfrac{c_2}{\tau_i}-c_3\beta-c_4\beta^{c_5}-c_6\right)\mathrm{e}^{-\frac{c_7}{\tau_i}}\\ \dfrac{1}{\tau_i}=\dfrac{1}{\tau+c_8\beta}-\dfrac{c_9}{\beta^3+1}\end{cases} \tag{A3}$$

其中，ρ 为空气密度；A 为风力机扫风面积；c_1—c_9 为 C_{p} 函数拟合系数；τ 为叶尖速比。

A2 特征值实部和阻尼比对控制参数灵敏度

对 DFIG 潮流计算最终得到的雅克比矩阵求逆，可得电网节点电压 $V(\theta)$和 DFIG 内部节点电压 $V_{\mathrm{s}}(\theta_{\mathrm{s}})$、$V_{\mathrm{r}}(\theta_{\mathrm{r}})$、$V_{\mathrm{g}}(\theta_{\mathrm{g}})$、$V_{\mathrm{m}}(\theta_{\mathrm{m}})$对 P_{G} 的灵敏度，下标 m 表示 DFIG 激磁支路，SG 节点电压 $V_{\mathrm{G}}(\theta_{\mathrm{G}})$和 DFIG 与电网相连节点电压 $V_{\mathrm{D}}(\theta_{\mathrm{D}})$都属于 $V(\theta)$。下面给出 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{sys}}$ 中受 P_{G} 影响的参数对应灵敏度推导过程。

根据复合函数求导法则，由式(A4) 可以推导得到 x-y 坐标系下 SG 相关参数灵敏度$\partial V_x/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_y/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{G}x}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{G}y}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_x/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_y/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial G_{\mathrm{L}}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial B_{\mathrm{L}}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{G}x}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{G}y}/\partial P_{\mathrm{G}}$。

$$\begin{cases}V_x=V\cos\theta & V_y=V\sin\theta\\ I_{xi}=\sum\limits_{j=1}^{N}(G_{ij}V_{xj}-B_{ij}V_{yj}) & I_{yi}=\sum\limits_{j=1}^{N}(B_{ij}V_{xj}+G_{ij}V_{yj})\\ G_{\mathrm{L}}=P_{\mathrm{L}}/V^2 & B_{\mathrm{L}}=-Q_{\mathrm{L}}/V^2\\ I_{\mathrm{L}x}=G_{\mathrm{L}}V_x-B_{\mathrm{L}}V_y & I_{\mathrm{L}y}=B_{\mathrm{L}}V_x+G_{\mathrm{L}}V_y\\ I_x=I_{\mathrm{G}x}-I_{\mathrm{L}x} & I_y=I_{\mathrm{G}y}-I_{\mathrm{L}y}\end{cases} \tag{A4}$$

其中，下标 x 和 y 表示参数对应 x-y 轴分量；N 为电网节点数；G 和 B 为节点导纳矩阵的分量(Y=G+jB)；G_{L} 和 B_{L} 为负荷的等效导纳(负荷为恒阻抗模型)；I_{G} 和 I_{L} 分别为 SG 输出电流和负荷电流。

由式(A5)可以推导得到 d-q 坐标系下 SG 相关参数灵敏度$\partial\cos\delta/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial\sin\delta/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_d/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_q/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_d/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_q/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial E'_{\mathrm{q}}/\partial P_{\mathrm{G}}$。

$$\begin{cases}E_{\mathrm{Q}x}=V_x+R_{\mathrm{a}}I_{\mathrm{G}x}-X_qI_{\mathrm{G}y} & E_{\mathrm{Q}y}=V_y+X_qI_{\mathrm{G}x}+R_{\mathrm{a}}I_{\mathrm{G}y}\\ \cos\delta=E_{\mathrm{Q}x}/\sqrt{E_{\mathrm{Q}x}^2+E_{\mathrm{Q}y}^2} & \sin\delta=E_{\mathrm{Q}y}/\sqrt{E_{\mathrm{Q}x}^2+E_{\mathrm{Q}y}^2}\\ V_{\mathrm{G}d}=V_{\mathrm{G}x}\sin\delta-V_{\mathrm{G}y}\cos\delta & V_{\mathrm{G}q}=V_{\mathrm{G}x}\cos\delta+V_{\mathrm{G}y}\sin\delta\\ I_{\mathrm{G}d}=I_{\mathrm{G}x}\sin\delta-I_{\mathrm{G}y}\cos\delta & I_{\mathrm{G}q}=I_{\mathrm{G}x}\cos\delta+I_{\mathrm{G}y}\sin\delta\\ E'_q=V_{\mathrm{G}q}+X'_dI_{\mathrm{G}d}+R_{\mathrm{a}}I_{\mathrm{G}q}\end{cases} \tag{A5}$$

其中，d 和 q 表示参数 d-q 轴分量；下标 E_{Q} 为虚拟电动势；δ 为功角；R_{a} 为定子电阻；X_{q} 为定子交轴同步电抗，E'_{q} 为交轴暂态电动势；X'_{d} 为直轴暂态电抗。

由式(A6)可以推导得到 d-q 坐标系下 DFIG 相关参数灵敏度$\partial V_{\mathrm{r}d}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{r}q}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{g}d}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{g}q}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{s}d}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{s}q}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{D}d}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial V_{\mathrm{D}q}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{s}d}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{s}q}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{D}d}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{D}q}/\partial P_{\mathrm{G}}$、

$\partial I_{\mathrm{g}d}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{g}q}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{r}d}/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial I_{\mathrm{r}q}/\partial P_{\mathrm{G}}$。

$$\begin{cases}
V_{\mathrm{m}d}=V_{\mathrm{m}}\cos(\theta_{\mathrm{m}}-\theta_{\mathrm{s}}) & V_{\mathrm{m}q}=V_{\mathrm{m}}\sin(\theta_{\mathrm{m}}-\theta_{\mathrm{s}})\\
V_{\mathrm{r}d}=V_{\mathrm{r}}\cos(\theta_{\mathrm{r}}-\theta_{\mathrm{s}}) & V_{\mathrm{r}q}=V_{\mathrm{r}}\sin(\theta_{\mathrm{r}}-\theta_{\mathrm{s}})\\
V_{\mathrm{g}d}=V_{\mathrm{g}}\cos(\theta_{\mathrm{g}}-\theta_{\mathrm{s}}) & V_{\mathrm{g}q}=V_{\mathrm{g}}\sin(\theta_{\mathrm{g}}-\theta_{\mathrm{s}})\\
V_{\mathrm{s}d}=V_{\mathrm{s}} & V_{\mathrm{s}q}=0\\
V_{\mathrm{D}d}=V_{\mathrm{D}x}\cos\theta_{\mathrm{s}}+V_{\mathrm{D}y}\sin\theta_{\mathrm{s}} & \\
V_{\mathrm{D}q}=V_{\mathrm{D}y}\cos\theta_{\mathrm{s}}-V_{\mathrm{D}x}\sin\theta_{\mathrm{s}} & \\
I_{\mathrm{s}d}=I_{\mathrm{g}d}-I_{\mathrm{D}d} & I_{\mathrm{s}q}=I_{\mathrm{g}q}-I_{\mathrm{D}q}\\
I_{\mathrm{D}d}=\dfrac{(V_{\mathrm{s}d}-V_{\mathrm{D}d})R_{\mathrm{l}}-V_{\mathrm{D}q}X_{\mathrm{l}}}{R_{\mathrm{l}}^2+X_{\mathrm{l}}^2} & \\
I_{\mathrm{D}q}=-\dfrac{(V_{\mathrm{s}d}-V_{\mathrm{D}d})X_{\mathrm{l}}+V_{\mathrm{D}q}R_{\mathrm{l}}}{R_{\mathrm{l}}^2+X_{\mathrm{l}}^2} & \\
I_{\mathrm{g}d}=\dfrac{(V_{\mathrm{g}d}-V_{\mathrm{s}d})R_{\mathrm{T}}+V_{\mathrm{g}q}X_{\mathrm{T}}}{R_{\mathrm{T}}{}^2+X_{\mathrm{T}}{}^2} & \\
I_{\mathrm{g}q}=-\dfrac{(V_{\mathrm{g}d}-V_{\mathrm{s}d})X_{\mathrm{T}}-V_{\mathrm{g}q}R_{\mathrm{T}}}{R_{\mathrm{T}}{}^2+X_{\mathrm{T}}{}^2} & \\
I_{\mathrm{r}d}=\dfrac{(V_{\mathrm{r}d}-s_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{m}d})R_{\mathrm{r}}+(s_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{r}q}-s_{\mathrm{r}}^2V_{\mathrm{m}q})X_{\mathrm{r}}}{R_{\mathrm{r}}^2+s_{\mathrm{r}}^2X_{\mathrm{r}}^2} & \\
I_{\mathrm{r}q}=\dfrac{-(s_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{r}d}-s_{\mathrm{r}}^2V_{\mathrm{m}d})X_{\mathrm{r}}+(V_{\mathrm{r}q}-s_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{m}q})R_{\mathrm{r}}}{R_{\mathrm{r}}^2+s_{\mathrm{r}}^2X_{\mathrm{r}}^2} &
\end{cases}\tag{A6}$$

其中，R_{l} 和 X_{l} 分别为 DFIG 与电网相连支路电阻和电抗；R_{T} 和 X_{T} 分别为 DFIG 定子和网侧变流器节点之间支路电阻和电抗(如图 1 所示)；R_{r} 和 X_{r} 为 DFIG 转子绕组电阻和电抗；s_{r} 为 DFIG 转子转差率。

利用结构保留模型矩阵表达的$\partial\lambda/\partial\alpha$如下所示：

$$\frac{\partial\lambda}{\partial\alpha}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{\psi}'^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\boldsymbol{A}_1}{\partial\alpha} & \dfrac{\partial\boldsymbol{B}_1}{\partial\alpha}\\ \dfrac{\partial\boldsymbol{C}_1}{\partial\alpha} & \dfrac{\partial\boldsymbol{D}_1}{\partial\alpha}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\varphi}\\ \boldsymbol{\varphi}'\end{bmatrix}\tag{A7}$$

其中，$\boldsymbol{\psi}$和$\boldsymbol{\varphi}$分别为 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{sys}}$ 的左、右特征向量；$\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}$ 为$\boldsymbol{\psi}$的转置；$\boldsymbol{\psi}'$ 和$\boldsymbol{\varphi}'$ 为增广左右特征向量，具体表达式见文献[2]；$\boldsymbol{A}_1$—$\boldsymbol{D}_1$ 为 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{sys}}$ 的分块矩阵，$\boldsymbol{A}_1$ 维度为 68×68，$\boldsymbol{B}_1$ 维度为 68×326，$\boldsymbol{C}_1$ 维度为 326×68，$\boldsymbol{D}_1$ 维度为 326×326。其对 P_{G} 的灵敏度由式(A8)—(A11)给出。

$$\left.\frac{\partial\boldsymbol{A}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(21:30,1:10)}=-\frac{1}{T_{\mathrm{J}}}\frac{\partial I_{\mathrm{q}}}{\partial P_{\mathrm{G}}}$$

$$\begin{cases}
\left.\dfrac{\partial\boldsymbol{A}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(53,56)}=\omega_{\mathrm{B}}\left(L_{\mathrm{m}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{sq}}}{\partial P_{\mathrm{G}}}+L_{\mathrm{rr}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{rq}}}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right)\\
\left.\dfrac{\partial\boldsymbol{A}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(54,56)}=-\omega_{\mathrm{B}}\left(L_{\mathrm{m}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{sd}}}{\partial P_{\mathrm{G}}}+L_{\mathrm{rr}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{rd}}}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right)\\
\left.\dfrac{\partial\boldsymbol{A}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,64)}=\dfrac{I_{\mathrm{g}d}\dfrac{\partial V_{\mathrm{g}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}+V_{\mathrm{g}d}\dfrac{\partial I_{\mathrm{g}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}+I_{\mathrm{g}q}\dfrac{\partial V_{\mathrm{g}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}}+V_{\mathrm{g}q}\dfrac{\partial I_{\mathrm{g}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}}}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}^2}+\\
\qquad\dfrac{I_{\mathrm{r}d}\dfrac{\partial V_{\mathrm{r}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}+V_{\mathrm{r}d}\dfrac{\partial I_{\mathrm{r}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}+I_{\mathrm{r}q}\dfrac{\partial V_{\mathrm{r}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}}+V_{\mathrm{r}q}\dfrac{\partial I_{\mathrm{r}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}}}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}^2}
\end{cases}\tag{A8}$$

其中，T_{J} 为 SG 惯性时间常数；ω_{B} 为额定转速；L_{m} 为 DFIG 励磁电感；L_{rr} 为 DFIG 转子侧自感；C_{u} 为直流电容；V_{dc} 为直流电容电压。式(A8)等号左侧下标括号内数值表示矩阵的行和列，如

(21:30,1:10)表示矩阵$\partial \boldsymbol{A}_1/\partial P_{\mathrm{G}}$中第 21 到 30 行和 1 到 10 列的矩阵，(53,56)表示$\partial \boldsymbol{A}_1/\partial P_{\mathrm{G}}$的第 53 行和 56 列。

$$\begin{cases}
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(21:30,1:10)} = \dfrac{(X_{\mathrm{d}}'-X_{\mathrm{q}})}{T_{\mathrm{J}}}\dfrac{\partial I_q}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(21:30,11:20)} = \dfrac{1}{T_{\mathrm{J}}}\left[(X_{\mathrm{d}}'-X_{\mathrm{q}})\dfrac{\partial I_d}{\partial P_{\mathrm{G}}} - \dfrac{\partial E_{\mathrm{q}}'}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right] \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(31:40,21:30)} = -\dfrac{K_{\mathrm{A}}}{T_{\mathrm{A}}}\left(\dfrac{1}{V_{\mathrm{G}}}\dfrac{\partial V_d}{\partial P_{\mathrm{G}}} - \dfrac{V_d}{V_{\mathrm{G}}^2}\dfrac{\partial V_{\mathrm{G}}}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right) \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(31:40,31:40)} = -\dfrac{K_{\mathrm{A}}}{T_{\mathrm{A}}}\left(\dfrac{1}{V_{\mathrm{G}}}\dfrac{\partial V_q}{\partial P_{\mathrm{G}}} - \dfrac{V_q}{V_{\mathrm{G}}^2}\dfrac{\partial V_{\mathrm{G}}}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right)
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(56,61)} = \dfrac{L_{\mathrm{m}}}{2H_{\mathrm{r}}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{r}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(56,62)} = -\dfrac{L_{\mathrm{m}}}{2H_{\mathrm{r}}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{r}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(56,63)} = -\dfrac{L_{\mathrm{m}}}{2H_{\mathrm{r}}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{s}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(56,64)} = \dfrac{L_{\mathrm{m}}}{2H_{\mathrm{r}}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{s}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(60,61)} = \omega_{\mathrm{B}} k_{\mathrm{i},2}\dfrac{\partial V_{\mathrm{s}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(60,66)} = \omega_{\mathrm{B}} k_{\mathrm{i},2}\dfrac{\partial I_{\mathrm{s}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(61,62)} = \omega_{\mathrm{B}} k_{\mathrm{i},3}\dfrac{\partial V_{\mathrm{s}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(61,66)} = \omega_{\mathrm{B}} k_{\mathrm{i},3}\dfrac{\partial I_{\mathrm{s}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,63)} = -\dfrac{1}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}}\dfrac{\partial V_{\mathrm{r}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,64)} = -\dfrac{1}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}}\dfrac{\partial V_{\mathrm{r}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,69)} = -\dfrac{1}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{r}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,70)} = -\dfrac{1}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{r}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,73)} = -\dfrac{1}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{g}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,74)} = -\dfrac{1}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{g}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,75)} = -\dfrac{1}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}}\dfrac{\partial V_{\mathrm{g}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(64,76)} = -\dfrac{1}{C_{\mathrm{u}}V_{\mathrm{dc}}}\dfrac{\partial V_{\mathrm{g}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(66,73)} = -\omega_{\mathrm{B}} k_{\mathrm{i},7}\dfrac{\partial I_{\mathrm{g}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(66,74)} = \omega_{\mathrm{B}} k_{\mathrm{i},7}\dfrac{\partial I_{\mathrm{g}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(66,75)} = \omega_{\mathrm{B}} k_{\mathrm{i},7}\dfrac{\partial V_{\mathrm{g}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{B}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(66,76)} = -\omega_{\mathrm{B}} k_{\mathrm{i},7}\dfrac{\partial V_{\mathrm{g}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{cases} \tag{A9}$$

其中，K_{A}和T_{A}为 SG 励磁调速器参数；H_{r}为 DFIG 惯性时间常数；$k_{\mathrm{i},2}$、$k_{\mathrm{i},3}$、$k_{\mathrm{i},7}$为 PI 参数中的积分参数。

$$\begin{cases}
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{C}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(21:30,11:20)} = -\dfrac{\partial V_q}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{C}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(31:40,11:20)} = \dfrac{\partial V_d}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{C}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(31:40,11:20)} = \dfrac{\partial V_d}{\partial P_{\mathrm{G}}} \quad \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{C}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(51:60,11:20)} = \dfrac{\partial I_d}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{C}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(68,56)} = -\left(L_{\mathrm{rr}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{r}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} + L_{\mathrm{m}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{s}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right) \\
\left.\dfrac{\partial \boldsymbol{C}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(69,56)} = L_{\mathrm{rr}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{r}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} + L_{\mathrm{m}}\dfrac{\partial I_{\mathrm{s}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{cases} \tag{A10}$$

$$\left\{\begin{array}{ll}
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{\substack{(21:30,\\247:286)}} = -\frac{\partial \sin\delta}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{\substack{(21:30,\\247:286)}} = -\frac{\partial \sin\delta}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{\substack{(31:40,\\247:286)}} = -\frac{\partial \cos\delta}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{\substack{(31:40,\\287:326)}} = -\frac{\partial \sin\delta}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(41:50,41:50)} = -\frac{\partial \sin\delta}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(41:50,51:60)} = \frac{\partial \cos\delta}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(51:60,41:50)} = -\frac{\partial \cos\delta}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(51:60,51:60)} = -\frac{\partial \sin\delta}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{array}\right.$$

$$\left\{\begin{array}{ll}
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{\substack{(167:206,\\247:286)}} = -\frac{\partial G_{\mathrm{L}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{\substack{(167:206,\\287:326)}} = \frac{\partial B_{\mathrm{L}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{\substack{(207:246,\\247:286)}} = -\frac{\partial B_{\mathrm{L}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{\substack{(207:246,\\287:326)}} = -\frac{\partial G_{\mathrm{L}}}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{array}\right.$$

$$\left\{\begin{array}{ll}
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(66,61)} = k_{\mathrm{p},2}\frac{\partial V_{\mathrm{s}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(66,66)} = k_{\mathrm{p},2}\frac{\partial I_{\mathrm{s}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(67,62)} = k_{\mathrm{p},3}\frac{\partial V_{\mathrm{s}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(67,66)} = k_{\mathrm{p},3}\frac{\partial I_{\mathrm{s}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(71,73)} = -k_{\mathrm{p},7}\frac{\partial I_{\mathrm{g}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(71,74)} = k_{\mathrm{p},7}\frac{\partial I_{\mathrm{g}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(71,75)} = k_{\mathrm{p},7}\frac{\partial V_{\mathrm{g}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(71,76)} = -k_{\mathrm{p},7}\frac{\partial V_{\mathrm{g}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{array}\right.$$

$$\left\{\begin{array}{ll}
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(83,86)} = -\frac{\partial V_{\mathrm{D}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(84,86)} = \frac{\partial V_{\mathrm{D}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(83,255)} = -\frac{\partial \cos\theta_{\mathrm{s}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(83,295)} = -\frac{\partial \sin\theta_{\mathrm{s}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(84,255)} = \frac{\partial \sin\theta_{\mathrm{s}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(84,295)} = -\frac{\partial \cos\theta_{\mathrm{s}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(85,84)} = -\frac{\partial \cos\theta_{\mathrm{s}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(85,85)} = -\frac{\partial \sin\theta_{\mathrm{s}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(86,84)} = \frac{\partial \sin\theta_{\mathrm{s}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(86,85)} = -\frac{\partial \cos\theta_{\mathrm{s}}}{\partial P_{\mathrm{G}}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(85,86)} = -\frac{\partial I_{\mathrm{D}q}}{\partial P_{\mathrm{G}}} & \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}_1}{\partial P_{\mathrm{G}}}\right|_{(86,86)} = \frac{\partial I_{\mathrm{D}d}}{\partial P_{\mathrm{G}}}
\end{array}\right. \tag{A11}$$

其中，$k_{\mathrm{p},2}$、$k_{\mathrm{p},3}$、$k_{\mathrm{p},7}$ 为 PI 参数中的比例参数。

桨距角 PI 参数 k_{p} 和 k_{i} 对应分块矩阵灵敏度如下：

$$\left\{\begin{array}{l}
\left.\frac{\partial \boldsymbol{C}_1}{\partial k_{\mathrm{p}}}\right|_{(65,55)} = -\omega_{\mathrm{B}} \\
\left.\frac{\partial \boldsymbol{A}_1}{\partial k_{\mathrm{i}}}\right|_{(58,55)} = -\omega_{\mathrm{B}}
\end{array}\right. \tag{A12}$$

根据式(A7)得到$\partial\lambda/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial\lambda/\partial k_{\mathrm{p}}$ 和$\partial\lambda/\partial k_{\mathrm{i}}$ 后，由式(A13)得到阻尼比灵敏度$\partial\zeta/\partial P_{\mathrm{G}}$、$\partial\zeta/\partial k_{\mathrm{p}}$ 和$\partial\zeta/\partial k_{\mathrm{i}}$：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \alpha} = \frac{1}{(\sqrt{\sigma^2 + \omega^2})^3}(\sigma\omega\frac{\partial \omega}{\partial \alpha} - \omega^2\frac{\partial \sigma}{\partial \alpha}) \tag{A13}$$

其中，$\partial\sigma/\partial\alpha$和$\partial\omega/\partial\alpha$分别为$\partial\lambda/\partial\alpha$的实部和虚部。

附录 B 风电系统关注特征值

v_w=9m/s。表 B1 给出部分阻尼比较小和实部较小的特征值，及其对应的振荡频率 f 和主导变量。

表 B1 测试系统关注模型
Table B1 Concerned mode the test system

λ	σ+jω	f/Hz	ζ	主导变量
$\lambda_{3,4}$	-17.223±323.92	51.553	0.053 1	Δi_{sd}，Δi_{sq}
$\lambda_{12,13}$	-1.061 0±14.848 4	2.3632	0.071 3	$\Delta\omega_r$，$\Delta\gamma$
$\lambda_{19,20}$	-0.468 5±8.025 8	1.2773	0.058 3	$\Delta\delta$，$\Delta\omega$
$\lambda_{21,22}$	-0.449 7±7.765 6	1.2359	0.057 8	$\Delta\delta$，$\Delta\omega$
$\lambda_{23,24}$	-0.333 8±7.185 0	1.1435	0.046 4	$\Delta\delta$，$\Delta\omega$
$\lambda_{25,26}$	-0.315 9±6.434 9	1.0242	0.049 0	$\Delta\delta$，$\Delta\omega$
$\lambda_{27,28}$	-0.413 4±6.255 6	0.9956	0.065 9	$\Delta\delta$，$\Delta\omega$
λ_{58}	-5.086 4×10^{-4}	0	1	Δk_p，Δk_i

风电系统中SG对应机电模式(与SG功角δ和转子转速ω强相关)的特征值是$\lambda_{19-34,36-41,53-54}$，表 B1 中给出阻尼比较小的 λ_{19-28}；$\lambda_{3,4}$与 DFIG 定子暂态电流 i_{sd}和 i_{sq}强相关，为 DFIG 定子模式，虽然其阻尼比较小，但振荡频率很高，本文不考虑其优化；$\lambda_{12,13}$与 DFIG 转子转速ω_r和轴系扭转角 γ 强相关，为轴系模式，虽然其振荡频率较小，但阻尼比高于 0.05，且不受系统运行方式变化的影响，本文也不考虑其优化；λ_{58}与桨距角 PI 参数 k_p和 k_i强相关，为衰减模式。