DOI：10.13245/j.hust.250387

柔性励磁系统无功阻尼电压控制策略

贾思思[1] 王 丹[1] 毛承雄[1] 张建承[2]
(1．华中科技大学强电磁技术全国重点实验室，湖北 武汉 430074；
2．国网浙江省电力有限公司电力科学研究院，浙江 杭州 310027)

摘要 为解决高比例新能源接入情况下常规柔性励磁系统功角稳定与电压稳定协调控制能力不足的问题，提出了一种新的柔性励磁系统无功阻尼电压控制策略．构建含新能源接入及柔性励磁无功通道的拓展Phillips-Heffron模型，分析柔性励磁无功通道作用特性及其阻尼与电压支撑机理，设计基于动态权重分配单元的定子无功稳定器控制策略，实现阻尼和电压支撑的自适应协调控制．仿真验证表明：该控制策略能适应不同新能源接入比例下带来的不同的稳定问题挑战，可提供阻尼和电压协调支撑能力，提高电压跌落最低点和恢复速度，同时显著降低了功角和有功的振荡首摆峰值和持续时间．

关键词 柔性励磁系统；定子无功稳定器；无功通道；阻尼；电压稳定
中图分类号 TM712 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0001-08

Reactive power-based damping and voltage control strategy for flexible excitation systems

JIA Sisi[1] *WANG Dan*[1] *MAO Chengxiong*[1] *ZHANG Jiancheng*[2]
(1．State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China；2．State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute，Hangzhou 310027，China)

Abstract To solve the problem of insufficient coordinated control capability of power angle stability and voltage stability of conventional flexible excitation system (FES) under the condition of high-proportion renewable energy integration，a new reactive power damping voltage control strategy for FES was proposed．An extended Phillips-Heffron model containing renewable energy integration and the reactive power channel of FES was constructed，the action characteristics of the reactive power channel of FES and its damping and voltage support mechanisms were analyzed，and a stator reactive power stabilizer control strategy based on a dynamic weight allocation unit was designed to realize the adaptive coordinated control of damping and voltage support．Simulation verification shows that the different stability problem challenges brought by different proportions of renewable energy integration can be adapted to by this control strategy，the coordinated support capability of damping and voltage can be provided，and the nadir of voltage dip and the recovery speed are improved，and the first swing peaks and durations of power angle and active power oscillations are significantly reduced simultaneously．

Key words flexible excitation systems；stator reactive power stabilizer；reactive power channel；damping；voltage stability

近年来，风电、光伏等新能源技术快速发展．然而，新能源机组在运行与控制特性上与常规机组存在显著差异[1-2]，随着新能源接入比例提高，电网动态特性日趋复杂，对系统安全稳定运行带来了较大影响[3]．一方面，新能源机组动态无功支撑能力较弱，其大规模接入会降低系统短路容量，可能加剧电压稳定问题[4]；另一方面，风电、光伏渗透率水平、并网点位置和控制器参数等因素会对系统阻

收稿日期 2025-08-18．
作者简介 贾思思(2001—)，女，硕士研究生；王 丹(通信作者)，教授，E-mail：wangdan@mail.hust.edu.cn．
基金项目 国家电网有限公司科技项目(5100-202419021A-1-1- ZN)．

尼产生不同程度的影响，可能造成跨区联络线振荡抑制能力下降[5-6]，进而影响系统功角稳定性[7-8]．

同步机组作为保障电力安全稳定供应的“压舱石”，在高比例新能源接入下作用关键，发挥其支撑与调节能力是提升系统稳定性的重要途径．励磁系统作为提高电力系统稳定性最为经济有效的措施之一[9]，目前工程中广泛应用晶闸管自并励系统，其强励能力受机端电压影响较大，暂态无功支撑与振荡抑制能力有限，为更好适应新型电力系统运行需求提出的柔性励磁系统是一种基于全控器件的新型自并励励磁系统，具备双通道控制能力．相较晶闸管励磁可保证更优越的强励性能，还可提供无功控制通道，为提高电力系统稳定性提供了新的可能．

柔性励磁系统控制策略的研究集中在提升功角稳定性．文献[10]建立了柔性励磁系统模型，通过阻尼转矩法揭示了其提升阻尼的机理．文献[11-13]提出基于模型实测校核的柔性励磁系统无功阻尼控制器参数整定方法，验证了控制技术的有效性．然而，现有研究尚未充分考虑新能源不同比例接入对系统稳定的影响演变，研究表明随着新能源渗透率增加，系统电压失稳风险可能更为突出[14-16]，且当新能源与同步机电气距离较近时，新能源机端电压水平与同步机控制特性密切相关[17]，此情况下，现有柔性励磁控制中通过牺牲部分电压性能以增强阻尼的策略，可能难以适应新能源比例持续增长带来的稳定风险．因此，本研究在新能源接入背景下，推导计及柔性励磁系统的单机无穷大系统数学模型，分析了其定子无功稳定器(stator reactive power stabilizer，SRPS)的作用机理，并围绕阻尼支撑与电压支撑特性展开深入研究，提出了一种基于SRPS的无功阻尼电压控制策略，通过动态权重分配实现阻尼和电压支撑的自适应协调控制，在不同新能源接入比例下进行系统故障仿真对比，验证了柔性励磁系统无功通道的支撑能力及所提控制策略的有效性．

1　考虑新能源接入的柔性励磁系统数学模型

柔性励磁系统功率单元由前级整流装置、直流电容和斩波装置构成，经励磁变压器接至机端形成自并励励磁．本研究以安装有柔性励磁系统的单机无穷大系统为研究对象，并考虑新能源接入输电线路，系统结构如图1所示，图中：U_{t}为发电机端电压，U_{w}为新能源接入点电压，U_{s}为无穷大母线电压；I_{t}为定子电流；P_{w}为新能源机组等效功率注入值；x_{TL1}为机端至新能源接入点的主变压器电抗和输电线路电抗之和，x_{L2}为新能源接入点至无穷大母线的线路电抗．为简化理论分析，忽略了变速风机和光伏发电中由电力电子变换器所主导的快动态，针对新能源机组模型仅考虑最基本的输出外特性，即等效为功率注入，并且考虑其无功支撑能力相对较弱，本研究假设新能源机组无功功率为零．

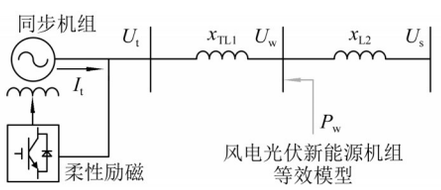


图1　基于新能源接入的柔性励磁单机无穷大系统示意图

基于图1所示系统的代数方程与发电机三阶微分方程，并在系统稳定运行点处线性化，可以推导得出考虑新能源接入影响的柔性励磁单机无穷大系统线性化数学模型为

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{\delta}\\ \Delta\dot{\omega}\\ \Delta\dot{E}'_{\mathrm{q}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \omega_0 & 0\\ -\dfrac{K_1}{T_{\mathrm{J}}} & -\dfrac{D}{T_{\mathrm{J}}} & -\dfrac{K_2}{T_{\mathrm{J}}}\\ -\dfrac{K_4}{T'_{\mathrm{d0}}} & 0 & -\dfrac{K_3}{T'_{\mathrm{d0}}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta\omega\\ \Delta E'_{\mathrm{q}}\end{bmatrix}+$$
$$\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -\dfrac{K_{\mathrm{Q1}}}{T_{\mathrm{J}}}\\ \dfrac{1}{T'_{\mathrm{d0}}} & -\dfrac{K_{\mathrm{Q2}}}{T'_{\mathrm{d0}}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta E_{\mathrm{fd}}\\ \Delta B_{\mathrm{rQ}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ -\dfrac{K_{\mathrm{P1}}}{T_{\mathrm{J}}}\\ -\dfrac{K_{\mathrm{P2}}}{T'_{\mathrm{d0}}}\end{bmatrix}\Delta B_{\mathrm{wP}},\tag{1}$$

式中：系统的状态变量$\Delta\delta$，$\Delta\omega$和$\Delta E'_{\mathrm{q}}$分别表示同步机组功角偏差、同步机组转差和同步机组交轴暂态电动势偏差；ΔE_{fd}和ΔB_{rQ}为系统的控制变量，分别为励磁电压偏差和无功通道注入无功作用的等效导纳偏差；ΔB_{wP}为新能源有功功率作用的等效导纳偏差；D为阻尼系数；T_{J}为转子惯性时间常数；T'_{d0}为转子开路时间常数；ω_0为发电机初始转速；K_1～K_4，K_{Q1}～K_{Q2}，K_{P1}～K_{P2}为电力系统非线性模型在稳定运行点处线性化的系数，与电力系统自身阻抗参数、稳态运行时的电气量相关，其具体表达式为

$$K_1=\frac{(x_{\mathrm{q}}-x'_{\mathrm{d}})i_{\mathrm{tq0}}U_{\mathrm{s}}\sin\delta_0}{x'_{\mathrm{d}\Sigma}}+\frac{(E'_{\mathrm{q0}}+(x_{\mathrm{q}}-x'_{\mathrm{d}})i_{\mathrm{td0}})U_{\mathrm{s}}\cos\delta_0}{x_{\mathrm{q}\Sigma}},$$

$$K_2=\frac{i_{\mathrm{tq0}}x_{\mathrm{q}\Sigma}}{x'_{\mathrm{d}\Sigma}},\quad K_3=\frac{x_{\mathrm{d}\Sigma}}{x'_{\mathrm{d}\Sigma}},\quad K_4=(x_{\mathrm{d}\Sigma}-x'_{\mathrm{d}\Sigma})\frac{U_{\mathrm{s}}\sin\delta_0}{x'_{\mathrm{d}\Sigma}},$$

$$K_{Q1}=x_{TL}u_{td0}\frac{x_q i_{td0}+u_{tq0}}{x_{q\Sigma}}+x_{TL}u_{tq0}\frac{x'_d i_{tq0}-u_{td0}}{x'_{d\Sigma}},$$

$$K_{Q2}=-\frac{x_{TL}(x_d-x'_d)}{x'_{d\Sigma}}u_{tq0},$$

$$K_{P1}=-\frac{x_q i_{td0}+u_{tq0}}{x_{q\Sigma}}x_{L2}u_{wq0}+\frac{x'_d i_{tq0}-u_{td0}}{x'_{d\Sigma}}x_{L2}u_{wd0},$$

$$K_{P2}=(x'_d-x_d)\frac{x_{L2}u_{wd0}}{x'_{d\Sigma}},$$

$x_{TL}=x_{TL1}+x_{L2}$，$x_{q\Sigma}=x_q+x_{TL}$，$x'_{d\Sigma}=x'_d+x_{TL}$，其中，x_q和x_d分别为交轴、直轴同步电抗，x'_d为直轴暂态电抗，u_{td0}，u_{tq0}，i_{td0}和i_{tq0}分别为发电机初始状态交直轴电压、电流，u_{wd0}，u_{wq0}为新能源接入点初始状态交直轴电压，U_{t0}为发电机端电压初始值．

依据式(1)可进一步得到考虑新能源接入影响的柔性励磁系统单机无穷大系统Phillips-Heffron模型如图2所示．

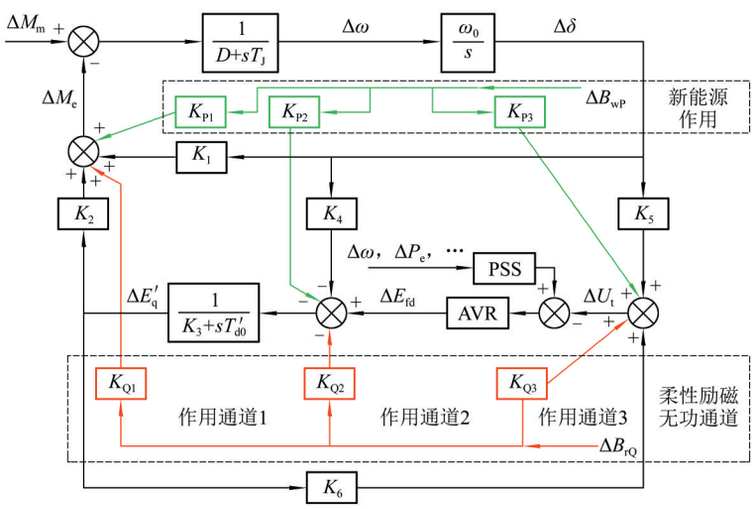


图2　考虑新能源接入影响的柔性励磁系统单机无穷大系统Phillips-Heffron模型

图2中：ΔM_m，ΔM_e和ΔP_e分别为机械转矩偏差、电磁转矩偏差和有功功率偏差；s为拉普拉斯算子；PSS为电力系统稳定器；AVR为自动电压调节器；K_5，K_6，K_{Q3}，K_{P3}为稳定运行点处线性化的系数，具体表达式为

$$K_5=\frac{u_{td0}x_q U_s\cos\delta_0}{x_{q\Sigma}U_{t0}}-\frac{u_{tq0}x'_d U_s\sin\delta_0}{x'_{d\Sigma}U_{t0}},\quad K_6=\frac{u_{tq0}x_{TL}}{x'_{d\Sigma}U_{t0}},$$

$$K_{Q3}=\frac{u_{td0}^2x_q x_{TL}}{U_{t0}x_{q\Sigma}}+\frac{u_{tq0}^2x'_d x_{TL}}{U_{t0}x'_{d\Sigma}},$$

$$K_{P3}=-\frac{u_{td0}u_{wq0}}{U_{t0}}\frac{x_q x_{L2}}{x_{q\Sigma}}+\frac{u_{tq0}u_{wd0}}{U_{t0}}\frac{x'_d x_{L2}}{x'_{d\Sigma}}.$$

由图2分析可知：新能源接入将通过作用系数K_{P1}～K_{P3}对同步机组电磁转矩和机端电压产生影响，其作用强度与新能源接入位置和新能源接入占比有关．当稳态时，因新能源机组发电的随机性和波动性，将对机组产生附加电磁转矩，可能危害系统稳定性；当系统发生短路故障时，新能源机组有功跌落和恢复在短时间内对机组产生了不同方向的附加电磁转矩，可能加剧系统功率不平衡问题．而柔性励磁系统具有双通道控制特性，可通过SRPS的上层控制实现机端无功功率注入/吸收的灵活调节，当系统受扰时迅速提供无功支撑，提升系统稳定性．

2　考虑新能源接入的柔性励磁系统无功阻尼电压控制策略

2.1　柔性励磁系统定子侧无功通道特性分析

为更好应对不同比例的新能源接入带来的挑战，现针对柔性励磁系统定子侧无功通道的阻尼支撑特性和电压支撑特性展开研究．

2.1.1　阻尼支撑特性分析

由图2分析可知：柔性励磁系统通过无功通道对同步机组电磁转矩产生影响，进而为系统提供阻尼支撑．可推导其提供的电磁转矩为

$$\Delta M_Q=\left(K_{Q1}-K_2\frac{K_A K_{Q3}+K_{Q2}}{T'_{d0}s+K_3+K_A K_6}\right)\Delta B_{rQ}=G_{QD}(s)\Delta B_{rQ},\tag{2}$$

式中：K_A为电压调节器放大倍数；$G_{QD}(s)$为柔性励磁阻尼控制通道传递函数．

根据作用环节不同，ΔM_Q可分为两部分：一部分是直接电磁转矩ΔM_{Q1}，其通过作用通道1直接作用于机电振荡环节为同步机组提供电磁转矩，作用强度与系数K_{Q1}有关；另一部分是间接电磁转矩ΔM_{Q2}，其通过作用通道2和3分别作用在励磁绕组和励磁控制系统上间接为同步机组提供电磁转矩，作用强度与系数K_{Q2}和K_{Q3}有关．其中，直接电磁转

矩不经过转子绕组可迅速提供支持，间接电磁转矩响应较慢但经过励磁控制环节放大，大部分工况下其值大于直接电磁转矩，故柔性励磁系统SRPS在故障前期由作用通道1迅速及时地提供阻尼转矩，在故障中后期加上通道2和3之后可进一步提供更强的阻尼支撑.

2.1.2　电压支撑特性分析

基于传统同步机组的单机无穷大系统，系统的稳定性问题以暂态功角失稳为主[18]，但因故障期间新能源机组有功出力会下降，并且新能源机组无功支撑能力较弱，随着新能源机组接入比例增加，系统稳定的主导形式将从功角稳定演化为电压稳定，即在发生系统扰动后，可能功角还未失稳就出现电压崩溃现象[16]. 故在分析柔性励磁系统提升阻尼的基础上，还亟须研究其对电压的支撑特性.

为进一步分析柔性励磁系统电压支撑机理，在图2基础上忽略电磁转矩及机械转矩等转子机械环节，得到励磁系统与机端电压耦合模型如图3所示，图中ΔU_{tref}为机端电压参考值偏差.

由图3分析可知：当出现电压波动时，柔性励磁系统可以通过定转子侧两种通道对电压起到调节作用. 具体为：通道1是常规励磁通道，当机端电压波动时，通过对励磁电压的控制来调节机端的无功输出/吸收，该通道采用AVR控制，须要经过转子绕组的延时响应；通道2则是柔性励磁系统的无功通道，可以通过K_{Q3}直接连通至机端，由于全控电力电子器件动作速度快，因此当机端电压出现波动时，该通道可快速向机端注入无功功率，实现更好的电压支撑能力. 该通道产生的附加电压为

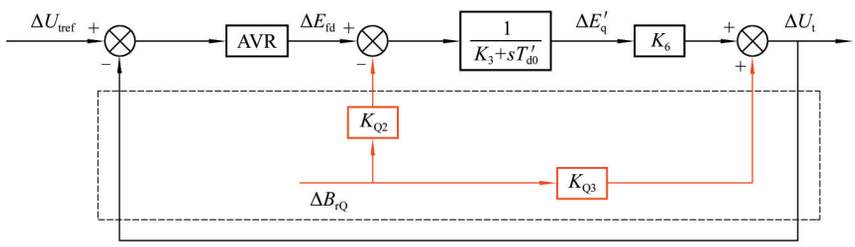


图3　分析电压支撑特性的等效框图

$$\Delta U_{\mathrm{Q}}=\frac{K_{\mathrm{Q3}}-K_{\mathrm{Q2}}K_3K_6+K_{\mathrm{Q3}}K_3T'_{\mathrm{d0}}s}{1+sK_3T'_{\mathrm{d0}}}\Delta B_{\mathrm{rQ}}=G_{\mathrm{QU}}(s)\Delta B_{\mathrm{rQ}},$$

式中$G_{\mathrm{QU}}(s)$为柔性励磁电压控制通道传递函数.

2.2　柔性励磁系统无功阻尼电压控制策略

为有效发挥柔性励磁系统阻尼和电压支撑特性，提升同步机组应对不同比例新能源接入带来的挑战的能力，基于特性分析，提出了一种综合考虑阻尼和电压支撑特性的柔性励磁系统SRPS控制策略，其控制框图如图4所示，图中：T_1～T_6为超前滞后环节时间常数；T_{w1}～T_{w6}和T_8～T_9为信号处理环节时间常数；K_{S1}和K_{S3}为增益系数；M和N为滤波器阶数；ΔQ_{D}为阻尼支撑部分输出信号；Q_{Dmax}和Q_{Dmin}为阻尼支撑部分输出限幅；ΔQ_{U}为电压支撑部分输出信号；Q_{Umax}和Q_{Umin}为电压支撑部分输出限幅；k_{D}为阻尼控制权重系数；k_{U}为电压控制权重系数；ΔQ为SRPS输出信号.

考虑阻尼支撑部分，可采用阻尼转矩分析法进行设计，阻尼转矩分析法基于电力系统线性化模型，分解发电机的电磁转矩得到阻尼转矩和同步转矩，故须要设计阻尼支撑部分的SRPS经过无功通道传递后最大程度地向电力系统提供正阻尼转矩，并保持同步转矩不发生较大偏移，以此有效抑制系统振荡，增强功角稳定性. 由式(2)可以得到基于阻尼支撑部分的SRPS提供的电磁转矩为

$$\Delta M_{\mathrm{Q}}=G_{\mathrm{QD}}(s)G_{\mathrm{QDS}}(s)\Delta x,$$

式中：$G_{\mathrm{QD}}(s)$为考虑阻尼支撑特性的SRPS控制传递函数；Δx为输入信号.

因为励磁调节器等环节造成$G_{\mathrm{QD}}(s)$相位滞后，须要通过$G_{\mathrm{QDS}}(s)$来进行相位校正，使得柔性励磁系统提供的电磁转矩最大程度地为系统提供阻尼转矩，所以设计考虑阻尼支撑特性的SRPS控制如图4中阻尼支撑部分所示，其中信号处理环节可抗无功反调和实现滤波，超前滞后环节则用于补偿相位偏差.

考虑电压支撑部分，设计直接通过无功的调整来实现机端电压的反馈控制，其控制策略如图4中电压支撑部分，输入信号为机端电压偏差ΔU_{t}，经过PI调节为机组提供迅速的电压支撑.

进一步地，为协调阻尼和电压支撑的综合性能，本研究采用动态权重分配，依据实时检测信号反馈系统状态，自适应动态分配阻尼和电压控制的权重系数. 为有效提升机组抑制振荡的能力和暂态电压稳定性能，实时检测信号选用ΔU_{t}和ΔP_{e}. 初始状态设定阻尼控制权重k_{D}和电压控制权重k_{U}均为0.5，ΔQ为SRPS输出信号.

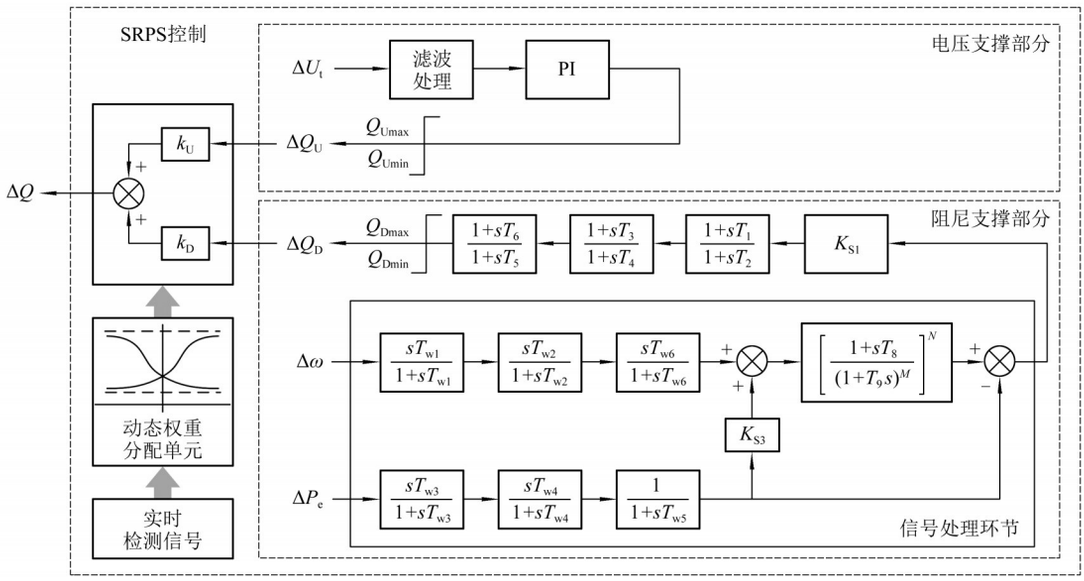


图4　基于SRPS的无功阻尼电压控制框图

为实现控制权重与系统状态的动态匹配，将系统扰动程度转化为统一的控制需求度量，给出综合电压需求U_1和综合阻尼需求D_1表达式为

$$\begin{cases} U_1=\min\left(1,\ \sqrt{(\Delta U_t/0.2)^2+(\Delta U_t/(300\Delta t))^2}\right); \\ D_1=\min\left(1,\ \dfrac{0.5|\Delta P_e|}{0.15}+0.3\left|\dfrac{\Delta P_e}{\Delta t}\right|/80+\dfrac{0.2|\Delta P_e\Delta t|}{0.1}\right), \end{cases}$$

$$\begin{cases} k_U=0.5+0.3\tanh(4U_1)-0.3\tanh(4D_1); \\ k_D=1-k_U, \end{cases} \tag{3}$$

式中Δt为采样步长．当U_1或D_1为0时表示无需求，为1时表示高需求，确保仅在有需求时调整阻尼和电压控制权重，其中综合电压需求U_1以电压偏差幅度和电压变化率作为电压性能表示因素，采用平方项来强调故障严重性；综合阻尼需求D_1则以有功不平衡程度、有功变化率和能量偏差积累作为阻尼性能表示因素．通过需求因子反馈系统性能状态，进而优先解决更紧急的问题，如式(3)所示实时调整权重分配，其中采用tanh函数可实现小需求时平缓，大需求时灵敏，并且调节平滑且防止过调．另外配备严重故障工况特殊处理模块，本研究对其设定为当发生电压严重跌落($|\Delta U_t|>0.6$)时，k_U迅速调整为0.85，以给予及时电压支撑，降低电压崩溃风险．该单元依据实时状态参数调整权重，实现更为灵活的协调控制，拓宽机组运行工况和有效应对不同比例新能源接入引起的主导稳定问题变化的情况．

3　仿真验证

为验证本文柔性励磁系统无功阻尼电压控制策略的有效性，基于图1所示系统在Matlab/Simulink仿真环境中搭建仿真模型．其中同步机组采用基于本文控制策略的柔性励磁系统、基于常规控制的柔性励磁系统[12]和基于晶闸管的传统励磁系统，分别在多种工况下进行对比分析．同步机组模型以某实际水电同步机组为研究对象，其额定容量为944.5 MVA，额定功率为850 MW，额定电压为22 kV，额定励磁电压为421.5 V，额定励磁电流为4111.8 A．新能源机组则以风电机组为例，风电场由额定容量1.5 MW的双馈风电机组组成，其具体参数参考文献[19]．设定SRPS的无功注入容量极限为同步机组容量的10%，同步发电机按照额定工况运行．

3.1　机端电压阶跃及无功负荷投切仿真分析

为验证本文控制策略在常规工况下可有效提升系统阻尼振荡能力和电压支撑能力，首先考虑新能源接入比例为0，本研究新能源接入比例定义为新能源出力占新能源和同步机组出力之和的比例．

3.1.1　机端电压阶跃4%仿真分析

设定仿真时间t=1 s，同步机组机端电压指令值向上阶跃4%，采用3种不同的励磁控制系统的仿真结果如图5所示，各参数采用标幺值表示．图中：U_f为励磁电压；dω为机组转速偏差；Q为SRPS注入的无功功率．其中，常规柔性励磁控制采用已提出的柔性励磁系统阻尼控制技术，晶闸管励磁控制采用常规的晶闸管励磁系统控制技术．

由图5可知：相较于晶闸管励磁系统，本文控制策略可以在机端指令发出瞬间通过无功通道给予有效的电压支撑，电压跟随指令更为迅速且平稳，

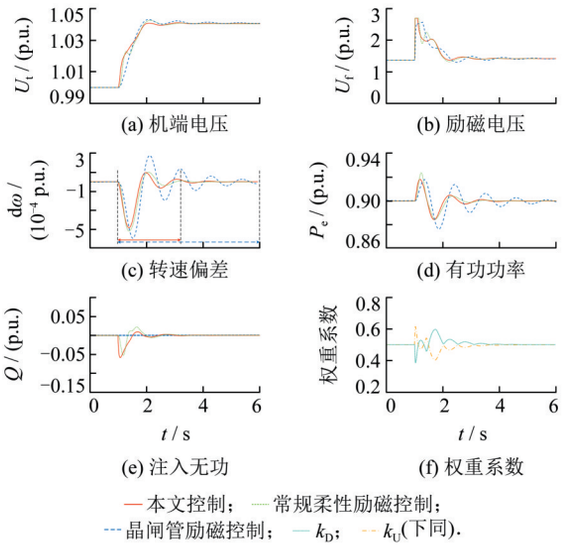


图5　机端电压阶跃4%仿真结果图

同时显著提升了系统阻尼振荡的能力，减小了转子转差和机组有功功率的首摆峰值，振荡平息时间从5.0 s减少至2.2 s左右，振荡时间降低超55%；相较于常规柔性励磁控制，本文控制电压支撑性能更为优越，权重系数可依据系统状态实时动态调整，实现了更快跟随电压指令值，使电压波形更为平滑稳定，同时降低了转差和有功的首摆峰值.

3.1.2　无功负荷变化仿真分析

设定仿真时间t=1 s，同步机组机端切除100 Mvar的感性无功负荷，其仿真结果如图6所示. 由图6可知：相较于晶闸管励磁系统，本文控制策略在无功负荷变化情况下可以提供更强的无功支撑，电压更快恢复平稳，同时振荡时间从5.0 s减少至2.5 s左右，振荡时间降低约50%，可以显著提升机组稳定性；相较于常规柔性励磁控制，本文控制策略的电压波动峰值更小，有功和转差首摆峰值更小，振荡平息时间相近，验证了本文控制策略对电

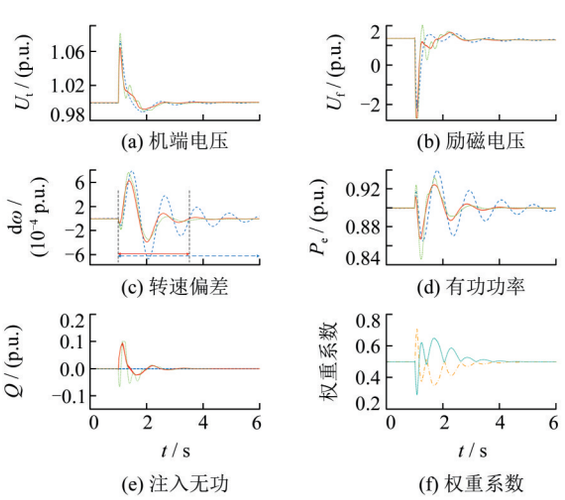


图6　无功负荷变化仿真结果图

压和阻尼支撑的有效协调，改善了常规柔性励磁控制中牺牲电压性能来提升阻尼的问题.

3.2　主变高压侧三相短路故障仿真分析

为验证本文控制策略在不同比例新能源接入下可有效提升系统稳定性，开展不同比例新能源接入的系统故障仿真对比分析.

3.2.1　低占比新能源接入时主变高压侧三相短路仿真分析

设定新能源接入比例为5%，接入点在线路的1/6处(靠近同步机组)，设定新能源始终接入系统，即具有优异的低电压穿越能力. 设定仿真时间t=1 s，同步机组的主变压器高压侧发生三相短路故障，0.1 s后故障切除，其仿真结果如图7所示.

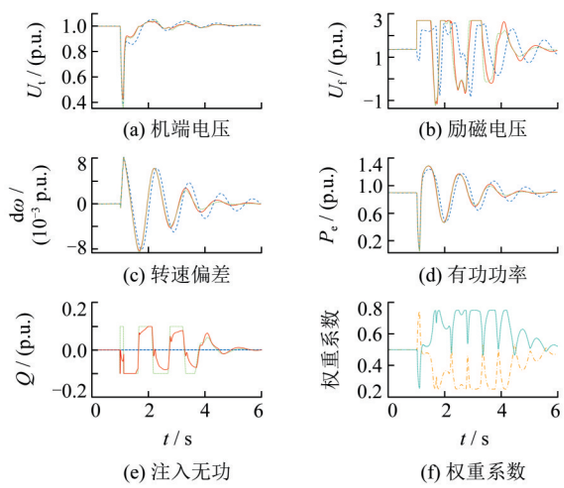


图7　低占比新能源接入时三相短路0.1 s故障仿真结果图

由图7可知：当新能源接入比例较低时，相较于晶闸管励磁系统，本文控制策略在机端电压跌落较多情况下仍可以通过柔性励磁实现强励来保障励磁电压及时上升，同时结合SRPS提供的阻尼和电压支撑，有效提升了电压跌落最低点，使电压恢复更为迅速，并降低了转差和有功的振荡时间；相较于常规柔性励磁控制，本文控制策略将电压跌落最低点从0.36 p.u.升高为0.41 p.u.，提高了近14%，电压恢复后半程更平稳，且阻尼振荡性能相近.

进一步验证本文控制策略可有效应对低占比新能源接入时占主导的功角稳定问题，增大故障切除时间至0.165 s，晶闸管励磁系统发生失稳，3种控制的仿真结果如图8所示. 由图8可知：当新能源接入比例较低时，晶闸管励磁控制下的系统发生严重故障可能导致阻尼不足进而引发功角和有功振荡失稳，电压也会持续振荡；常规柔性励磁控制因为阻尼控制提升了系统阻尼，保障了系统稳定性；本文控制策略则在提升阻尼支撑能力的基础上，降低机组电压跌落和波动程度.

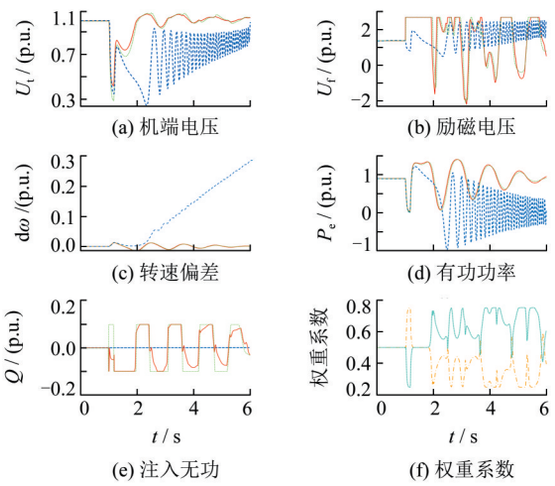


图 8　低占比新能源接入时主变高压侧三相短路 0.165 s 故障仿真结果图

3.2.2　高占比新能源接入时主变高压侧三相短路仿真分析

设定新能源接入比例为 37.5%，仿真时间 t=1 s，主变压器高压侧发生三相短路故障，0.1 s 后故障切除，其仿真结果如图 9 所示．

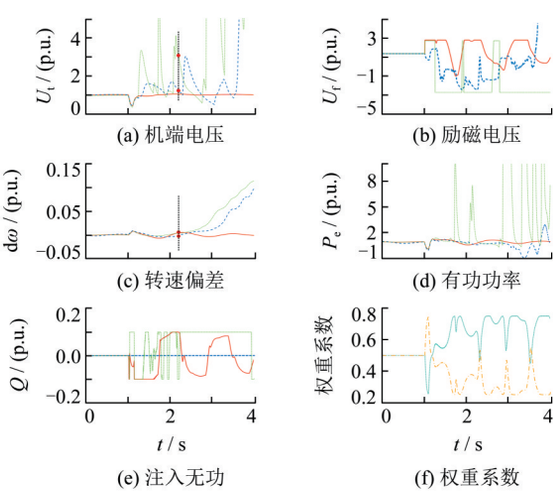


图 9　高占比新能源接入时三相短路 0.1 s 故障仿真结果图

由图 9 可知：在新能源接入比例提高后，当系统发生三相短路故障时，首先出现了暂态电压崩溃，晶闸管励磁控制和常规柔性励磁系统均无法维持系统稳定，在电压失稳后功角和有功也失稳，特别由于常规柔性励磁控制当故障发生时提升阻尼以抑制低频振荡，但电压控制与阻尼控制之间存在固有矛盾，因此该策略不可避免地会牺牲部分电压性能，在高比例新能源系统中反而可能会恶化系统性能．本文控制策略则可提供有效的电压和阻尼综合支撑性能，维持系统安全稳定运行，验证了无功阻尼电压控制可显著提升高比例新能源系统的稳定性．

4　结语

本研究在考虑新能源接入下，推导数学模型得到了计及柔性励磁系统无功通道的 Phillips-Heffron 模型，分析得出柔性励磁系统定子无功稳定器产生的附加阻尼可通过 3 个通道作用于机电振荡环节，同时对柔性励磁系统支撑电压稳定的机理进行了研究，推导出电压控制通道传递函数．在此基础上，提出了一种考虑阻尼和电压综合支撑特性的柔性励磁系统无功阻尼电压控制策略，并采用动态权重分配，依据系统状态实时调节 SRPS 中支撑分配系数，实现应对不同比例新能源接入下主导稳定问题变化的自适应协调控制．最后通过仿真试验，在不同新能源比例和工况下验证了本文控制策略能更充分发挥柔性励磁系统无功通道支撑性能，显著提升系统抑制振荡和电压支撑的能力，可为保障同步机组在能源供应中有效发挥压舱石作用奠定重要基础．但本研究仅考虑了新能源接入的扩展单机无穷大系统，后续将对多机系统柔性励磁控制展开研究．

参　考　文　献

[1] 黄牧涛，陈兴邦，张静姝，等．计及备用评估和 N-1 故障的多电源联合优化调度[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2025，53(7)：1-7．

[2] 周孝信，陈树勇，鲁宗相，等．能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]．中国电机工程学报，2018，38(7)：1893-1904．

[3] 张智刚，康重庆．碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]．中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818．

[4] 李东东，梁自超，周玉琦．含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估[J]．电力系统保护与控制，2015，43(13)：8-14．

[5] SHAH R，MITHULANANTHAN N，BANSAL R C．Oscillatory stability analysis with high penetrations of large-scale photovoltaic generation[J]．Energy Conversion and Management，2013，65：420-429．

[6] EFTEKHARNEJAD S，VITTAL V，HEYDT G T，et al．Small signal stability assessment of power systems with increased penetration of photovoltaic generation：a case study[J]．IEEE Transactions on Sustainable Energy，2013，4(4)：960-967．

[7] 王清，薛安成，郑元杰，等．双馈型风电集中接入对暂态功角稳定的影响分析[J]．电网技术，2016，40(3)：875-881．

[8] 刘斯伟，李庚银，周明．双馈风电机组对接入区域系统暂态功角稳定性的影响分析[J]．电力系统保护与控制，2016，44(6)：56-61．

[9] SUN Z L，CAI G W，YANG D Y，et al．A method for the evaluation of generator damping during low-frequency oscillations[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2019，34(1)：109-119．

[10] YANG J W，CHEN Z，MAO C X，et al．Analysis and assessment of VSC excitation system for power system stability enhancement[J]．International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2014，57：350-357．

[11] 张建承，张甜甜，熊鸿韬，等．柔性励磁系统无功阻尼控制器参数整定方法及现场应用[J]．电工技术学报，2022，37(17)：4435-4445．

[12] 张甜甜．柔性励磁系统阻尼控制方法及现场应用[D]．武汉：华中科技大学，2021．

[13] ZHANG T T，CHENG L P，HE S L，et al．Optimal design method of flexible excitation system for improving power system stability[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2021，57(3)：2120-2128．

[14] 袁小明，程时杰，胡家兵．电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]．中国电机工程学报，2016，36(19)：5145-5154．

[15] 屠竞哲，易俊，王超，等．考虑光伏动态特性的功角电压交互失稳机理分析[J]．电力系统自动化，2020，44(13)：157-165．

[16] 毛安家，马静，蒯圣宇，等．高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]．中国电机工程学报，2020，40(9)：2745-2755．

[17] 孙华东，徐式蕴，贺静波，等．高比例电力电子电力系统过电压(一)：定义、分类及相关要求[J]．中国电机工程学报，2024，44(1)：22-33．

[18] 黎晓，刘崇茹，辛蜀骏，等．暂态功角稳定与暂态电压稳定的耦合机理分析与耦合强度评估指标[J]．中国电机工程学报，2021，41(15)：5091-5107．

[19] 成昕雨，王丹，李文浩，等．考虑不对称转速边界约束的变速抽蓄机组综合惯量调频控制[J]．电力系统自动化，2024，48(16)：88-98．