

大型光伏储能电站与同步发电机励磁的非线性协调控制策略

刘松¹,李啸骢^{1,2},陈登义¹

(1. 广西大学 电气工程学院,广西 南宁 530004;

2. 广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室,广西 南宁 530004)

摘要:在大规模光伏储能电站接入系统的容量和比重不断增加的情况下,光伏电站应具备一定的电压和功率调节能力来支撑电网的稳定运行。以大型光伏储能电站接入的多机电力系统为研究对象,推导其微分代数系统结构模型,提出了采用光伏储能电站逆变器与同步发电机励磁协调来提高系统稳定水平的非线性控制策略。该策略避免了不同控制器单独设计造成的配合不协调问题,同时可以对电压和有功等多个目标量进行控制。由于采用非线性设计方法,控制器可在大范围适用而不局限于设计点附近。仿真结果表明,所设计的控制器可以有效提高系统的电压和功率调节能力,保障系统安全稳定运行。

关键词:大规模光伏储能电站;储能系统;多目标全息反馈控制;非线性协调控制;新能源电力系统

中图分类号:TM 761;TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003028

0 引言

化石能源过度消耗与人类日益增加的能源需求使可再生能源的开发利用变得尤为迫切。太阳能作为清洁绿色能源的代表,以其低碳安全、高储量无噪声的特点得到了快速发展^[1-2]。在光伏电站容量及渗透率不断提高的形势下,由于光伏逆变器的低惯量特性,当系统受到扰动时若其不参与系统调节,将给常规电源的调频调峰造成很大压力。同时,当系统电压跌落时若不能及时向电网提供有功、无功功率支撑,将引发系统振荡甚至脱网,造成对电网的二次冲击,严重影响电网的安全稳定运行^[3-4]。

目前对于大规模光伏储能发电站对电力系统稳定性影响的研究^[5-7],主要集中于光伏发电系统的动态模型分析^[8-9]和光伏电站对系统有功频率^[10-11]、无功电压^[12-13]、小干扰稳定^[14-16]和暂态稳定^[17-18]的影响等方面。文献[1]分析了大规模光伏储能系统接入后与电力系统产生的交互影响,并对光伏电站接入所引起的系统电压、频率、功角稳定性改变等问题进行讨论,给出了进一步研究的合理化建议。文献[19]对大规模光伏储能电厂进行动态等值建模,通过轨迹灵敏度分析可得系统受扰后的振荡情况与光伏电站所采用的控制策略密切相关,并指出可以通过改变系统运行点方式调整,但未能给出切实可行

的控制策略。文献[8]对光伏电站的精确与降阶模型进行分析,认为降阶模型在动态稳定分析方面具有足够精度,并通过仿真验证了其动态性能。文献[16]推导了含光伏电站的多机线性系统模型,通过灵敏度分析得出光伏电站容量、接入位置和系统转动惯量均会对系统振荡造成影响。文献[20]为抑制智利100 MW光伏电场并网运行时因线路故障引起的频率偏移和功率振荡,对光伏逆变器进行了虚拟同步控制器设计,但未考虑与电力系统间的交互影响。文献[21]研究了光伏电站接入单机无穷大系统的有功阻尼控制策略,该策略对系统的低频振荡抑制效果明显。文献[17]研究了一种电池储能系统附加频率控制策略,通过将储能系统引入控制器设计中有效改善电力系统的暂态稳定性。上述研究中,由于便于设计、经济性好的特点,大多针对单一光伏电站采用虚拟同步设计或附加控制,未考虑电力系统的整体协调配合,或因采用线性化方法^[19-20]仅在小扰动分析时具有较好效果。

含有光伏储能电站的电力系统具有较强的非线性特点,直接采用非线性控制方法将会有较好的效果。多目标全息反馈控制 MOHFC^[22](Multi-Objective Holographic Feedback Control)是采用低维度输入、高维度输出的非线性控制方法,能够同时对多个目标量进行约束,避免了控制模式间的动态切换,在系统偏离设计运行点时所设计的控制器仍然具有良好的控制性能。因此,本文在已有研究的基础上推导了光伏储能电站的多机电力系统模型,采用 MOHFC 方法设计光伏储能电站与同步发电机励磁的非线性多目标全息反馈协调控制 MOHFCC(Multi-Objective Holographic Feedback Coordinated Control),并通过时域仿真验证了其有效性。

收稿日期:2019-10-16;**修回日期:**2020-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51267001);广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118338);广西科学研究与技术开发计划项目(14122006-29)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267001),the Natural Science Foundation of Guangxi(2014GXNSFAA118338) and the Scientific Research and Technical Development Project of Guangxi(14122006-29)

1 光伏储能电力系统模型

光伏储能电力系统模型由光伏储能电站动态模型、同步发电机动态模型、负荷特性方程和网络潮流约束方程组成。

1.1 光伏储能电站动态模型

对于含 m 台光伏储能电站的系统, dq 坐标系下光伏储能逆变器交流侧的数学模型为^[8,23-24]:

$$\begin{cases} \frac{dI_{pb,dk}}{dt} = -\frac{R_{pb,k}}{L_{pb,k}} I_{pb,dk} + \omega_k I_{pb,qk} + \frac{u_{d,k} - V_{pb,dk}}{L_{pb,k}} \\ \frac{dI_{pb,qk}}{dt} = -\frac{R_{pb,k}}{L_{pb,k}} I_{pb,qk} - \omega_k I_{pb,dk} + \frac{u_{q,k} - V_{pb,qk}}{L_{pb,k}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $I_{pb,dk}$ 、 $I_{pb,qk}$ 分别为光伏储能电站 k 逆变器并网电流的 d 、 q 轴分量, 均为状态变量; ω_k 、 $V_{pb,dk}$ 和 $V_{pb,qk}$ 分别为光伏储能电站 k 的接入点角频率、电压的 d 轴和 q 轴分量; $R_{pb,k}$ 、 $L_{pb,k}$ 分别为光伏储能电站 k 输出线路的电阻、滤波电感; $u_{d,k}$ 和 $u_{q,k}$ 分别为光伏储能电站 k 逆变器交流侧 d 轴和 q 轴的电压控制量。在电网发生故障(如电网电压跌落)时, 光伏储能电站可以继续保持正常运行, 储能设备在直流侧吸收因电网电压跌落而产生的多余能量, 保持直流侧功率平衡。

1.2 同步发电机动态模型

对于含 n 台同步发电机的光伏储能电力系统, 同步发电机采用暂态稳定控制中三阶经典模型, 即:

$$\begin{cases} d\delta_i/dt = \omega_0(\omega_i - 1) \\ d\omega_i/dt = [P_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - 1)]/T_{ji} \\ dE'_{qi}/dt = (E_{fi} - E_{qi})/T'_{d0i} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{ei} = E'_{qi} I_{qi}, \quad E_{qi} = E'_{qi} + (X_{di} - X'_{di}) I_{di}$$

$$I_{gi} = \sqrt{I_{di}^2 + I_{qi}^2}, \quad V_{gi} = \sqrt{(E'_{qi} - X'_{di} I_{di})^2 + (X_{qi} I_{qi})^2}$$

其中, δ_i 、 ω_i 、 E'_{qi} 分别为同步发电机 i 的功角、转子角频率和暂态电动势, 均为状态变量; E_{qi} 为同步发电机 i 空载电动势; I_{di} 、 I_{qi} 分别为同步发电机 i 电流的 d 、 q 轴分量; P_{mi} 、 P_{ei} 分别为同步发电机 i 的机械功率、电磁功率; T'_{d0i} 、 T_{ji} 分别为同步发电机 i 定子开路时的励磁绕组、转子绕组的惯性时间常数; X_{di} 、 X'_{di} 、 X_{qi} 分别为同步发电机 i 的 d 轴同步电抗、 d 轴暂态电抗、 q 轴同步电抗; D_i 为同步发电机 i 的阻尼系数; ω_0 为系统基准角频率; E_{fi} 为同步发电机 i 的励磁电压, 为控制变量; I_{gi} 、 V_{gi} 分别为同步发电机 i 的电流、电压。

1.3 负荷特性方程

对于接入电网中的负荷, 所采用的数学模型为:

$$\begin{cases} P_L = a_{L1} P_{L0} (V_L/V_{L0})^2 + a_{L2} P_{L0} (V_L/V_{L0}) + a_{L3} P_{L0} \\ Q_L = b_{L1} Q_{L0} (V_L/V_{L0})^2 + b_{L2} Q_{L0} (V_L/V_{L0}) + b_{L3} Q_{L0} \end{cases} \quad (3)$$

其中, V_L 、 V_{L0} 、 P_L 和 Q_L 分别为负荷节点电压、额定电压、有功和无功功率; P_{L0} 、 Q_{L0} 分别为负荷节点额定电压下的有功和无功功率; a_{L1} — a_{L3} 和 b_{L1} — b_{L3} 为常数。

1.4 网络潮流约束方程

上述多机多源电力系统的潮流代数方程为:

$$\begin{bmatrix} I_g \\ I_{pb} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gpb} & Y_{gl} \\ Y_{pbg} & Y_{ppb} & Y_{pbl} \\ Y_{lg} & Y_{lpb} & Y_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_q \\ V_{pb} \\ V_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, I_g 、 I_{pb} 分别为同步发电机、光伏储能电站电流向量; 节点导纳矩阵中主对角线元素 Y_{gg} 、 Y_{ppb} 、 Y_{ll} 分别为同步发电机、光伏储能电站、负荷节点的自导纳矩阵, 非对角线元素分别为同步发电机、光伏储能电站、负荷节点间的互导纳矩阵; E'_q 、 V_{pb} 、 V_L 分别为同步发电机、光伏储能电站、负荷节点的电压向量。

将系统进行降阶处理, 消去网络中的无源节点, 展开可得同步发电机节点的潮流代数方程:

$$I_g = (Y_{gg} - Y_{gl} Y_{ll}^{-1} Y_{lg}) E'_q + (Y_{gpb} - Y_{gl} Y_{ll}^{-1} Y_{lpb}) V_{pb} = Y' E'_q + Y'' V_{pb} \quad (5)$$

则第 i 台同步发电机节点的电流为:

$$\begin{cases} I_{g,di} = \sum_{j=1}^n E'_{qj} (G'_{ij} \sin \delta_{ij} - B'_{ij} \cos \delta_{ij}) + \sum_{k=1}^m V_{pb,k} (G''_{ik} \sin \varphi_{ik} - B''_{ik} \cos \varphi_{ik}) \\ I_{g,qi} = \sum_{j=1}^n E'_{qj} (G'_{ij} \cos \delta_{ij} + B'_{ij} \sin \delta_{ij}) + \sum_{k=1}^m V_{pb,k} (G''_{ik} \cos \varphi_{ik} + B''_{ik} \sin \varphi_{ik}) \end{cases} \quad (6)$$

其中, G'_{ij} 、 B'_{ij} 分别为同步发电机节点 i 和节点 j 互导纳的实部、虚部; G''_{ik} 、 B''_{ik} 分别为同步发电机节点 i 和光伏储能节点 k 互导纳的实部、虚部; δ_{ij} 为同步发电机节点 i 、 j 间的相角差; φ_{ik} 为同步发电机节点 i 与光伏储能节点 k 间的相角差。光伏储能电站电流为:

$$I_{pb} = (Y_{pbg} - Y_{pbl} Y_{ll}^{-1} Y_{lg}) E'_q + (Y_{ppb} - Y_{pbl} Y_{ll}^{-1} Y_{lpb}) V_{pb} \quad (7)$$

则第 k 台光伏储能电站的电流为:

$$\begin{cases} I_{pb,dk} = \sum_{j=1}^n E'_{qj} (G'_{kj} \cos \delta_{kj} + B'_{kj} \sin \delta_{kj}) + \sum_{l=1}^m V_{pb,l} (G''_{kl} \cos \varphi_{kl} + B''_{kl} \sin \varphi_{kl}) \\ I_{pb,qk} = \sum_{j=1}^n E'_{qj} (-G'_{kj} \sin \delta_{kj} + B'_{kj} \cos \delta_{kj}) + \sum_{l=1}^m V_{pb,l} (-G''_{kl} \sin \varphi_{kl} + B''_{kl} \cos \varphi_{kl}) \end{cases} \quad (8)$$

其中, G'_{kj} 、 B'_{kj} 分别为光伏储能节点 k 和同步发电机节点 j 互导纳的实部、虚部; G''_{kl} 、 B''_{kl} 分别为光伏储能节点 k 和节点 l 互导纳的实部、虚部; δ_{kj} 为光伏储能节点 k 、同步发电机节点 j 间的相角差; φ_{kl} 为同步发电机节点 l 、光伏储能节点 k 间的相角差。式(1)—(3)、(6)、(8)构成了完整的光伏储能电力系统模型。

1.5 微分代数系统模型标准化

采用如下形式的微分代数系统模型:

$$\begin{cases} dx/dt = f(x, w) + g(x, w)u \\ \rho(x, w) = 0 \\ y = h(x, w) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $x \in \mathbf{R}^n$ 、 $y \in \mathbf{R}^m$ 、 $w \in \mathbf{R}^l$ 和 $u \in \mathbf{R}^r$ 分别为系统状态向量、输出向量、代数约束向量和控制向量; f 、 g 为光滑向量场, ρ 为代数约束方程组; h 为输出函数向量。将上述系统的微分代数方程转化为式(9)所示的标准形式, 即:

$$f(x, w) = [f_1(x, w), \dots, f_k(x, w), \dots, f_m(x, w), f_{m+1}(x, w), \dots, f_{m+i}(x, w), \dots, f_{m+n}(x, w)]^T \quad (10)$$

$$\begin{cases} f_k(x, w) = \begin{bmatrix} -R_{pb,k} I_{pb,dk} / L_{pb,k} + \omega_k I_{pb,qk} \\ -R_{pb,k} I_{pb,qk} / L_{pb,k} - \omega_k I_{pb,dk} \end{bmatrix} \\ f_{m+i}(x, w) = \begin{bmatrix} (\omega_i - 1)\omega_0 \\ [P_{mi} - P_{ci} - D_i(\omega_i - 1)] / T_{ji} \\ [-E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di})I_{di}] / T'_{d0i} \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$g(x, w) = [g_1(x, w), \dots, g_k(x, w), \dots, g_m(x, w), g_{m+1}(x, w), \dots, g_{m+i}(x, w), \dots, g_{m+n}(x, w)]^T \quad (11)$$

$$\begin{cases} g_k(x, w) = [1/L_{pb,k} \quad 1/L_{pb,k}] \\ g_{m+i}(x, w) = [0 \quad 0 \quad 1/T'_{d0i}] \end{cases}$$

$$\rho(x, w) = [I_{pb}(x, w) \quad I_g(x, w)]^T \quad (12)$$

其中, $f(x, w)$ 、 $g(x, w)$ 为分块对角阵。由式(10)~(12)完成了对光伏储能电力系统微分代数模型的标准化, 下面通过选择期望的目标量设计系统的控制器。

2 光伏储能电站控制器

2.1 光伏储能电站非线性控制

在对光伏电站的早期研究中, 大多采用最大功率点跟踪(MPPT)控制, 以实现光伏储能电站输出的有功功率最大, 忽视了对系统的无功支撑, 导致电压跌落。当系统受到扰动后, 可能加重系统振荡影响甚至脱网。

为了保证系统的有功、电压和光伏储能电站电流输出稳定, 选取第 k 台光伏储能电站各电气量的偏差量 $\Delta P_{pb,k}$ 、 $\Delta V_{pb,k}$ 、 $\Delta I_{pb,dk}$ 和 $\Delta I_{pb,qk}$ 作为控制目标, 形成目标偏差量, 多目标输出方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_{pb,k} = P_{pb,k} - P_{pb,k0} \\ \Delta I_{pb,dk} = I_{pb,dk} - I_{pb,dk0} \\ \Delta V_{pb,k} = V_{pb,k} - V_{pb,k0} \\ \Delta I_{pb,qk} = I_{pb,qk} - I_{pb,qk0} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $I_{pb,qk0}$ 和 $V_{pb,k0}$ 分别为第 k 台光伏储能电站稳态运行时 q 轴电流和节点电压的参考值; $P_{pb,k0}$ 、 $I_{pb,dk0}$ 分别为有功功率输出和 d 轴电流的参考值。

由此, 构建 MOHFC 的布鲁诺夫斯基标准型:

$$d\Theta/dt = A\Theta + Bv \quad (14)$$

$$\Theta_k = [\Delta P_{pb,k} \quad \Delta I_{pb,dk} \quad \Delta V_{pb,k} \quad \Delta I_{pb,qk}]^T$$

其中, A 为目标量系数矩阵; B 为控制变量系数矩阵; v 为控制向量。将式(14)展开为:

$$\begin{bmatrix} d\Delta P_{pb,k}/dt \\ d\Delta I_{pb,dk}/dt \\ d\Delta V_{pb,k}/dt \\ d\Delta I_{pb,qk}/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{pb,k} \\ \Delta I_{pb,dk} \\ \Delta V_{pb,k} \\ \Delta I_{pb,qk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} v_k \quad (15)$$

其中, v_k 为控制向量中的元素。

由系统方程与其目标参考方程构成偏差方程:

$$\begin{cases} dx/dt = f(x, w) + g(x, w)u \\ 0 = \rho(x, w) \\ \Theta = h(\tilde{x}, \tilde{w}) \end{cases} \quad (16)$$

$$\tilde{x} = x - x_0, \quad \tilde{w} = w - w_0, \quad h(\tilde{x}, \tilde{w}) = y - y_0$$

根据式(15), 求目标函数的 Γ 导数:

$$\Gamma_f \Theta_k = \Gamma_f h_k(\tilde{x}, \tilde{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_k(\tilde{x}, \tilde{w})}{\partial x} & \frac{\partial h_k(\tilde{x}, \tilde{w})}{\partial w} \end{bmatrix} \Lambda(x, w) f(x, w) \quad (17)$$

$$\Lambda(x, w) = \begin{bmatrix} I_n \\ -\left(\frac{\partial \rho}{\partial w}\right)^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial x} \end{bmatrix}$$

其中, Γ_f 为输出函数向量对向量场 $f(x, w)$ 的 Γ 导数; I_n 为 $m \times m$ 阶单位矩阵。进而得出:

$$\begin{aligned} \Gamma_f h_k(\tilde{x}, \tilde{w}) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial h_k(\tilde{x}, \tilde{w})}{\partial x} & \frac{\partial h_k(\tilde{x}, \tilde{w})}{\partial w} \end{bmatrix} \Lambda(x, w) f(x, w) = \\ & [\Gamma_f \Delta I_{pb,dk} \quad \Gamma_f \Delta I_{pb,qk}]^T = \\ & \begin{bmatrix} -R_{pb,k} I_{pb,dk} / L_{pb,k} + \omega_k I_{pb,qk} - V_{pb,dk} / L_{pb,k} \\ -R_{pb,k} I_{pb,qk} / L_{pb,k} - \omega_k I_{pb,dk} - V_{pb,qk} / L_{pb,k} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\Gamma_g \Gamma_f h_k(\tilde{x}, \tilde{w}) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial (\Gamma_f h_k(\tilde{x}, \tilde{w}))}{\partial x} & \frac{\partial (\Gamma_f h_k(\tilde{x}, \tilde{w}))}{\partial w} \end{bmatrix} \Lambda(x, w) g(x, w) =$$

$$[\Gamma_g \Gamma_f \Delta I_{pb,dk} \quad \Gamma_g \Gamma_f \Delta I_{pb,qk}]^T = [1/L_{pb,k} \quad 1/L_{pb,k}]^T \quad (19)$$

其中, Γ_g 为输出函数向量对向量场 $g(x, w)$ 的 Γ 导数。由 Lyapunov 理论, 设计转化为线性空间下的系统控制律:

$$v = -K\Theta = R^{-1}B^T P\Theta \quad (20)$$

为使得式(15)转化为线性空间后的系数矩阵 $d\Theta/dt = (A - BK)\Theta$ 是 Hurwitz 矩阵, 即满足条件 $\text{Re}(\lambda_k[A - BK]) < 0$ 。控制矩阵 $K = R^{-1}B^T P$, P 为 Riccati 方程 $PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$ 的解, 其中 Q 、 R 为正定矩阵。

$$v_k = -K\Theta = \begin{bmatrix} -k_{k1} \Delta P_{pb,k} - k_{k2} \Delta I_{pb,dk} \\ -k_{k3} \Delta V_{pb,k} - k_{k4} \Delta I_{pb,qk} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中, $k_{k1} - k_{k4}$ 为控制矩阵中的元素。

由此可得出光伏储能电站逆变器的非线性控制律, 对于控制变量 $u_k = [u_{d,k} \quad u_{q,k}]^T$, 其表达式为:

$$\mathbf{u}_k = \left(\Gamma_g \Gamma_f \mathbf{h}_k(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \right)^{-1} \left(\mathbf{v}_k - \Gamma_f \mathbf{h}_k(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \right) = \begin{bmatrix} \left(\Gamma_g \Gamma_f \Delta I_{pb,dk} \right)^{-1} \left(-k_{k1} \Delta P_{pb,k} - k_{k2} \Delta I_{pb,dk} - \Gamma_f \Delta I_{pb,dk} \right) \\ \left(\Gamma_g \Gamma_f \Delta I_{pb,qk} \right)^{-1} \left(-k_{k3} \Delta V_{pb,k} - k_{k4} \Delta I_{pb,qk} - \Gamma_f \Delta I_{pb,qk} \right) \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(13)–(22)构成了光伏储能电站的非线性控制模型。

2.2 同步发电机非线性控制设计

发电机励磁在维持机端电压和系统频率稳定中起着重要作用,为此选择 V_{gi} 和 ω_i 作为发电机励磁控制的目标量。同时各同步发电机需要协调分配有功功率的输出以维持系统的功率平衡,为了精确跟踪发电机功率给定值, P_{ei} 也选作为控制目标,其实际值与参考值的偏差量为:

$$\begin{cases} \Delta \omega_i = \omega_i - \omega_{i0} \\ \Delta P_{ei} = P_{ei} - P_{ei0} \\ \Delta V_{gi} = V_{gi} - V_{gi0} \end{cases} \quad (23)$$

其中, ω_{i0} 、 P_{ei0} 、 V_{gi0} 分别为同步发电机 i 稳态运行时角频率、电磁功率、电压的参考值。

根据式(14)构建 MOHFC 的布鲁诺夫斯基标准型,且 $\Theta_i = [\Delta \omega_i \ \Delta P_{ei} \ \Delta V_{gi}]^T$,进而可以得出多目标输出方程展开式为:

$$\begin{bmatrix} d\Delta \omega_i / dt \\ d\Delta P_{ei} / dt \\ d\Delta V_{gi} / dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_i \\ \Delta P_{ei} \\ \Delta V_{gi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_i \quad (24)$$

由式(16)和式(17)可得出目标函数的 Γ 导数:

$$\begin{aligned} \Gamma_f \mathbf{h}_i(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{w}}) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}_i(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{w}})}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{h}_i(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{w}})}{\partial \mathbf{w}} \end{bmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \\ \Gamma_f \Delta V_{gi} &= \left[(X_{qi} I_{qi})^2 - V_{gi}^2 - (X_{di} I_{di} + T'_{d0i} X'_{di} dI_{di}/dt) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{V_{gi}^2 - (X_{qi} I_{qi})^2} + T'_{d0i} X'_{qi} I_{qi} dI_{qi}/dt \right] / (T'_{d0i} V_{gi}) \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Gamma_g \Gamma_f \mathbf{h}_i(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{w}}) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial (\Gamma_f \mathbf{h}_i(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{w}}))}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial (\Gamma_f \mathbf{h}_i(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{w}}))}{\partial \mathbf{w}} \end{bmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \\ \Gamma_g \Gamma_f \Delta V_{gi} &= \sqrt{V_{gi}^2 - (X_{qi} I_{qi})^2} / (T'_{d0i} V_{gi}) \quad (26) \end{aligned}$$

由式(20)可得:

$$\mathbf{v}_i = -\mathbf{K} \Theta_i = -k_{i1} \Delta \omega_i - k_{i2} \Delta P_{ei} - k_{i3} \Delta V_{gi} \quad (27)$$

其中, k_{i1} – k_{i3} 为控制矩阵中的元素。

进而可得控制变量 E_{fi} 的控制规律为:

$$\begin{aligned} E_{fi} &= \left(\Gamma_g \Gamma_f \mathbf{h}_i(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \right)^{-1} \left(\mathbf{v}_i - \Gamma_f \mathbf{h}_i(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \right) = \\ & \left(\Gamma_g \Gamma_f \Delta V_{gi} \right)^{-1} \left(-k_{i1} \Delta \omega_i - k_{i2} \Delta P_{ei} - k_{i3} \Delta V_{gi} - \Gamma_f \Delta V_{gi} \right) \quad (28) \end{aligned}$$

因此由式(22)和式(28)便构成了整个光伏储能电力系统的 MOHFC 规律的设计,系统的整体控制框图如附录 A 中图 A1 所示。控制器所需的反馈量均可由本地采集获取,具有分散控制的灵活性。对于

装有广域测量系统的发电站,控制律中的 $I_{pb,dk}$ 、 $I_{pb,qk}$ 、 I_{di} 、 I_{qi} 、 dI_{di}/dt 、 dI_{qi}/dt 等所需量可以由同步相量测量装置 (PMU) 进行量测或状态估计来获取,选择合适的动态状态估计算法能够得到系统所需量测量的超前预测值,满足工程实时应用。对于未加装 PMU 的系统,通过附录 A 中式 (A1) 使用本地常规量测信号实施控制。

3 仿真验证

本文采用 MATLAB / Simulink 在含光伏储能电站的 6 机系统上对所提出控制策略的有效性进行验证,系统中各发电机及线路数据参见文献 [25], 系统拓扑结构如图 1 所示。系统中 G_1 为平衡节点等值发电机, G_2 – G_5 为汽轮同步发电机, G_6 为同步调相机。2 座光伏储能电站 PVB₁ 和 PVB₂ 同容量同结构,其逆变器参数为: $R_{pb} = 0.05$ p.u., $L_{pb} = 0.1$ p.u.。逆变器的等值电流限幅为 $|I_{pb,dk}/I_{pb,dk0}| \leq 1.5$, $|I_{pb,qk}/I_{pb,qk0}| \leq 1.5$, 励磁调节器的电压限幅为 -6.4 p.u. $\leq E_f \leq 7.0$ p.u.。控制器相关参数见附录 A 中表 A1 与表 A2。

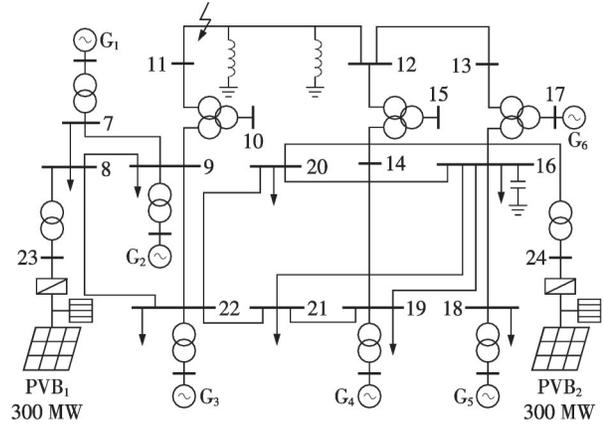


图1 含光伏6机24节点系统

Fig.1 6-machine 24-bus system with photovoltaic

为了考察控制器对系统扰动过程中动、静态性能的作用效果,选取系统中最为严重的三相短路大扰动与典型的电压波动小扰动和网络参数变化3种方式进行分析。含光伏储能电站的电力系统分别采用光伏储能电站 MPPT 控制与同步发电机 AVR+PSS 控制 (MPPT-AP)、光伏储能电站与同步发电机的 MOHFC 进行对比分析。

3.1 三相短路扰动

当 $t=0.5$ s 时系统在节点 11 和 12 之间发生三相短路接地故障,故障持续 0.15 s 后,系统恢复运行。图 2 为三相短路故障时,光伏储能电站接入下 G_2 – G_5 在不同控制器作用下的角频率动态响应曲线。图中, ω_i 为标么值。可见采用 MPPT-AP 时,系统频率波动次数较多且极易出现振荡失稳;采用 MOHFC 时系统振荡明显减少,系统频率在 3 s 内基本恢复稳

定。这是因为采用MOHFCC时,系统采用了非线性控制方法,不依赖于所设计的工作运行点,在抑制大扰动引起的系统振荡时效果明显。

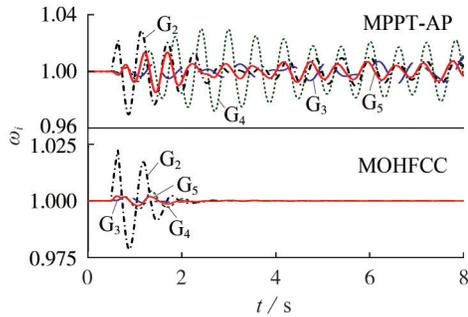


图2 同步发电机角频率响应曲线

Fig.2 Angular frequency curves of synchronous generator

图3为 G_4 的电压和有功功率详细动态响应过程。图中, V_{g4} 、 P_{g4} 均为标幺值,后同。从图中可以看出,同步发电机电压和有功功率在短路扰动过程中的动态曲线和图3的频率曲线波动变化一致。当系统采用MPPT-AP时,因光伏储能电站不能对系统进行功率支撑, G_4 出现持续振荡,无法满足系统稳定性要求;而当采用MOHFCC控制时,电压和功率振荡均得到了抑制,系统未出现振荡失稳的状况,同时能够较快平稳地恢复到稳定运行状态。

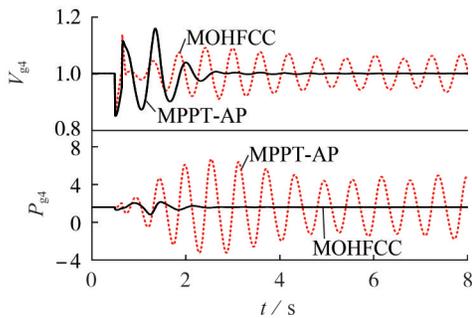


图3 短路扰动下 G_4 的响应曲线

Fig.3 Response curves of G_4 under short circuit disturbance

图4为光伏储能电站在短路扰动下的响应曲线。图中, $V_{pb,2}$ 、 $P_{pb,2}$ 为标幺值,后同。由图4可知,采用MPPT-AP时,光伏储能电站在受到三相短路故障的影响时,电压和有功功率振荡严重甚至失稳,此时光伏储能电站不能进行主动调节,更无法实现控制器之间的协调配合,甚至加重系统振荡,这是导致光伏储能电站脱网的主要原因;而采用MOHFCC时,光伏储能系统的有功与电压振荡能够很快平息,实现了控制目标间的动态协调。

3.2 电压波动扰动

发电机的电压调节可以在系统负荷变化时,调整系统潮流分布,是电力系统中常见的小扰动。为

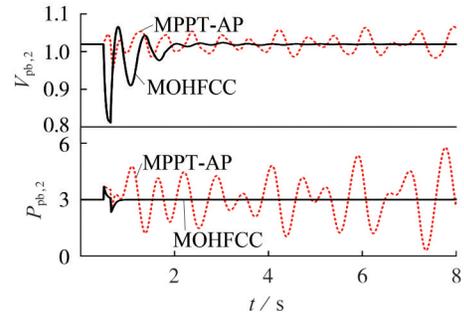


图4 短路扰动下 PVB_2 响应曲线

Fig.4 Response curves of PVB_2 under short circuit disturbance

此,在 $t=0.25$ s时对同步发电机进行电压扰动: G_2 、 G_4 电压上调2.5%, G_3 、 G_5 电压下调2.5%,图5和图6给出了系统在扰动过程中的响应曲线。

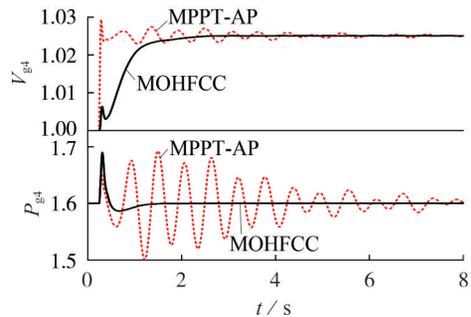


图5 电压波动下 G_4 响应曲线

Fig.5 Response curves of G_4 under voltage fluctuation

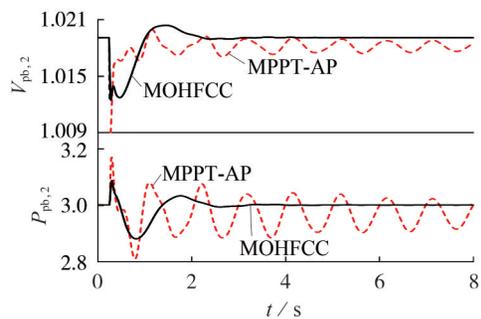


图6 电压波动下 PVB_2 响应曲线

Fig.6 Response curves of PVB_2 under voltage fluctuation

图5表明了 G_4 在不同控制器作用下对端电压进行调节时的响应曲线。 G_4 在MOHFCC作用下跟踪给定值精确,调节过程平稳,而在MPPT-AP作用下振荡较多,平滑度较差。表明MOHFCC在小扰动时同样具有良好的调节效果。

从图6所示的光伏储能电站电压波动曲线可以看出,采用MPPT-AP控制时,光伏储能电站电压波动振荡次数较多,并且由于未对电压和有功功率约束引起明显静态偏差;采用MOHFCC时,光伏储能

电站的电压和频率得到改善。这是由于有功功率与电压被考虑引入控制器设计当中,通过MOHFCC同时控制多个目标,使得光伏储能电站在系统电压改变时有功功率并未发生偏移,控制效果明显提高。

3.3 网络参数改变

若线路发生故障时断路器重合闸不成功,为保护系统安全运行,故障线路将被切除,这会引系统网络参数改变。为了考察控制器在系统参数变化时的控制效果,在 $t=0.5$ s时系统节点11、12之间发生三相短路故障,0.15 s后故障线路被切除,节点11、12之间线路断开,系统在所设计控制器作用下的动态响应曲线见附录B中图B1和图B2。

由图B1可知,故障线路切除后 G_4 的电压和有功功率能够保持稳定,波动较小。在这一过程中,潮流因电网拓扑结构的改变而重新分布,控制器也适应系统的动态变化,对目标量进行调整,两者共同作用使系统达到新的稳定运行状态。

图B2给出了系统线路发生短路故障时,切除线路导致网络结构变化的情况下,光伏储能电站的电压和有功功率波动曲线。从图中可以看出,短路故障发生时,系统波动较大,切除故障线路后,电压和有功功率依然能够维持稳定运行。进一步说明了所提出的控制方法在使得系统承受大扰动偏离设计运行点较大范围时仍具有良好的控制效果,同时对于网络参数的变化具有较强的鲁棒性,控制目标直接选择关注的物理量而不是单一状态量更易于工程应用,总体效果满足系统的动、静态性能要求。

4 结论

本文选择光伏储能电站作为研究对象,推导含光伏储能电站多机电力系统的微分代数系统非线性模型。研究了大型光伏储能电站与同步发电机励磁的MOHFCC,解决了光伏储能电站因无法提供必要的功率支撑和电压调节能力对系统稳定性造成的影响。所得结论如下:

(1)基于MOHFCC提出了含光伏储能电站的电力系统MOHFCC,该策略避免了分别设计控制器所带来的交互影响,同时能够对电压、有功功率等多个目标量进行约束;

(2)在含光伏储能电站的多机系统中,对比分析了2种典型场景中不同控制策略作用下的动态响应,验证了所提的控制策略能够有效增强系统的动、静态稳定性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review

on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.

[2] 方伟,刘怀东,秦婷,等. 含大型光伏电站的动态安全域[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 189-193, 199.
FANG Wei, LIU Huaidong, QIN Ting, et al. Dynamic security region with large-scale photovoltaic plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 189-193, 199.

[3] 高鹏程,王蕾,李立生,等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 190-196.
GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 190-196.

[4] 谢宁,陈晓科,徐晓刚,等. 大型光伏电站角形级联STATCOM电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 55-60.
XIE Ning, CHEN Xiaoke, XU Xiaogang, et al. Voltage control strategy for delta-connected cascaded STATCOM of large-scale photovoltaic power station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 55-60.

[5] 高本锋,姚磊,李忍,等. 大规模光伏电站并网的振荡模式分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 123-130.
GAO Benfeng, YAO Lei, LI Ren, et al. Analysis on oscillation modes of large-scale grid-connected PV power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 123-130.

[6] 陈实,李兴源,李宽. 光伏并网附加控制抑制交流串补引起的次同步谐振[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 24-29.
CHEN Shi, LI Xingyuan, LI Kuan. Supplementary photovoltaic grid-connection control for damping SSR induced by series capacitive compensation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 24-29.

[7] REMON D, CANTARELLAS A M, MAURICIO J M, et al. Power system stability analysis under increasing penetration of photovoltaic power plants with synchronous power controllers [J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(6): 733-741.

[8] EL-SHIMY M, SHARAF A, KHAIRY H, et al. Reduced-order modelling of solar-PV generators for small-signal stability assessment of power systems and estimation of maximum penetration levels [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(8): 1838-1847.

[9] REMON D, CANTARELLAS A M, RODRIGUEZ P. Equivalent model of large-scale synchronous photovoltaic power plants [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 5029-5040.

[10] 宋兵,余群兵,陈俊,等. 一种新能源电站有功功率柔性控制方法及应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 219-223.
SONG Bing, YU Qunbing, CHEN Jun, et al. Flexible control method of active power for renewable energy station and its application [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 219-223.

[11] CRĂCIUN B I, KERÉKES T, SÉRA D, et al. Frequency support functions in large PV power plants with active power reserves [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 849-858.

[12] LAMMERT G, PREMM D, OSPINA L D P, et al. Control of photovoltaic systems for enhanced short-term voltage stability and recovery [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 243-254.

[13] 周林,邵念彬. 大型光伏电站无功电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 116-122, 128.
ZHOU Lin, SHAO Nianbin. Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic plants [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 116-122, 128.

[14] SHAH R, MITHULANANTHAN N, BANSAL R C. Damping

- performance analysis of battery energy storage system, ultra-capacitor and shunt capacitor with large-scale photovoltaic plants[J]. *Applied Energy*, 2012, 96: 235-244.
- [15] BUENO P G, RUIZ-RODRIGUEZ F J, HERNÁNDEZ J C. Stability assessment for transmission systems with large utility-scale photovoltaic units[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2016, 10(5): 584-597.
- [16] 葛景, 都洪基, 赵大伟, 等. 光伏电站接入对多机电力系统低频振荡的影响分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(22): 63-70.
GE Jing, DU Hongji, ZHAO Dawei, et al. Influences of grid-connected photovoltaic power plants on low frequency oscillation of multi-machine power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(22): 63-70.
- [17] 王皓怀, 汤涌, 侯俊贤, 等. 提高互联电网暂态稳定性的大规模电池储能系统并网控制策略及应用[J]. *电网技术*, 2013, 37(2): 327-333.
WANG Haohuai, TANG Yong, HOU Junxian, et al. Grid-integration control strategy of large-scale battery energy storage system and its application to improve transient stability of interconnected power grid[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(2): 327-333.
- [18] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 893-901.
- [19] 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(1): 420-429.
- [20] REMON D, CAÑIZARES C A, RODRIGUEZ P. Impact of 100-MW-scale PV plants with synchronous power controllers on power system stability in northern Chile[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(11): 2958-2964.
- [21] 周林, 任伟, 余希瑞. 大型光伏电站抑制低频振荡的有功阻尼控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(11): 2987-2995.
- ZHOU Lin, REN Wei, YU Xirui. Active damping control strategy in the large-scale photovoltaic plants restraining low-frequency oscillations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(11): 2987-2995.
- [22] 刘辉, 李啸聪, 韦化. 多输入控制系统中目标全息反馈法的极点配置原理[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(7): 58-63.
LIU Hui, LI Xiaocong, WEI Hua. Pole assignment mechanism of nonlinear control with objective holographic feedbacks for the multiple-input controlled system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(7): 58-63.
- [23] MOURSİ M S E, KIRTLEY J L, XIAO W D. Fault ride through capability for grid interfacing large scale pv power plants[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2013, 7(9): 1027-1036.
- [24] YANG Z, SHEN C, ZHANG L, et al. Integration of a STATCOM and battery energy storage[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001, 16(2): 254-260.
- [25] LU Q, SUN Y Z. Nonlinear stabilizing control of multimachine systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, 4(1): 236-241.

作者简介:



刘松

刘松(1989—),男,河北唐山人,博士研究生,主要研究方向为含新能源电力系统分析与控制、非线性控制(E-mail: songliu86@126.com);

李啸聪(1959—),男,云南昆明人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、分析与控制、非线性控制等(E-mail: lhtlht@gxu.edu.cn);

陈登义(1979—),男,广西南宁人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统非线性控制。

(编辑 王欣竹)

Nonlinear coordinated control strategy of large-scale photovoltaic power station with energy storage and synchronous generator excitation

LIU Song¹, LI Xiaocong^{1,2}, CHEN Dengyi¹

(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: With the capacity and proportion of large-scale photovoltaic power station with energy storage integrated to system increasing, the photovoltaic power station should have certain voltage and power regulation ability to support the stable operation of the grid. The model of differential algebraic system for large-scale photovoltaic power station with energy storage integrated to multi-machine power system is deduced, and a nonlinear coordinated control strategy is proposed to improve the stability level of the system by using the coordination of inverters for photovoltaic power station with energy storage and synchronous generator excitation. The strategy avoids the improper coordination caused by the separate design of different controllers, and can control multiple indicators such as voltage and active power. Due to the application of nonlinear design methods, the controller can be applied in a wide range and not limited to the vicinity of the design point. The simulative results show that the designed controller can effectively improve the voltage and power regulation ability of the system and ensure the safe and stable operation of the system.

Key words: large-scale photovoltaic power station; energy storage system; multi-objective holographic feedback control; nonlinear coordinated control; new energy power system

附录 A

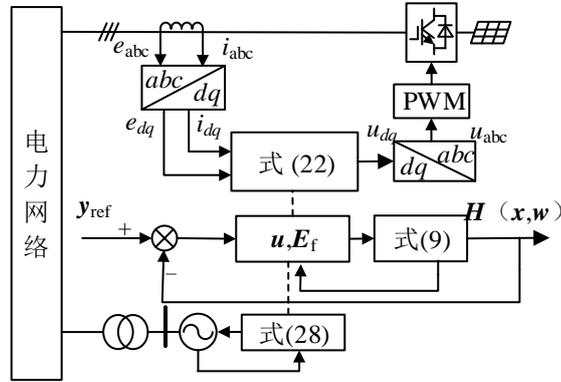


图 A1 MOHFCC 框图

Fig.A1 Block diagram of MOHFCC

$$\begin{cases} I_{di} = (Q_{ci} + X_{qi} I_{qi}^2) / \sqrt{[V_{gi} + (Q_{ci} X_{qi}) / V_{gi}]^2 + [(P_{ci} X_{qi}) / V_{gi}]^2} \\ I_{qi} = \sqrt{I_{gi}^2 - I_{di}^2} \end{cases} \quad (A1)$$

表 A1 同步发电机励磁控制器参数

Table A1 Parameters of synchronous generator excitation controller

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
k_{21}	12.0	k_{31}	10.0	k_{41}	9.5	k_{51}	8
k_{22}	112.5	k_{32}	105.6	k_{42}	108.2	k_{52}	100
k_{23}	23.2	k_{33}	24.0	k_{43}	23.6	k_{53}	21

表 A2 逆变器控制参数

Table A1 Parameters of inverter controller

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
k_{11}	10.5	k_{13}	9.5	k_{21}	9.5	k_{23}	10.0
k_{12}	15.0	k_{14}	12.0	k_{22}	14.5	k_{24}	13.5

附录 B

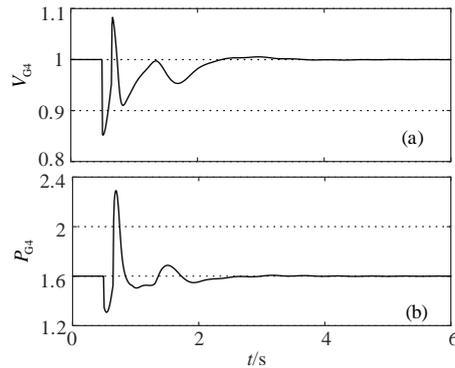


图 B1 G_4 动态响应曲线

Fig.B1 Dynamic response curve of G_4

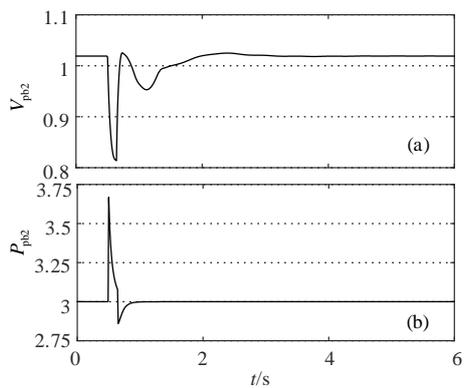


图 B2 PVB₂ 动态响应曲线
Fig.B2 Dynamic response curve with PVB₂