直流微网负荷分配与公共直流母线电压控制

陈雅菲[1,2]，肖宏飞[3]，陈磊磊[4]，周 栋[1]，吴晨曦[1]

（1. 杭州电子科技大学 自动化学院，浙江 杭州 310018；2. 浙江方圆电气设备检测有限公司，浙江 嘉兴 314001；3.杭州电子科技大学 信息工程学院，浙江 杭州 311305；4.浙江大学 电气工程学院，浙江 杭州 310058）

摘 要：*U–I* 下垂控制具有良好的自适应性及扩展性，适用于直流微网的电压控制及负荷分配，但传统下垂控制策略不能兼顾公共直流母线电压控制与负荷电流分配。文章提出了一种自适应控制策略，通过调节 DG 单元的电压、电流参考值，实现公共直流母线的电压控制和负荷电流的分配。此外，建立了自适应控制策略下的微网系统小信号模型进行微网系统的稳定性分析。仿真结果表明，采用所提控制策略的微网系统具有良好的稳定性，并且在负荷突变、DG 故障、系统运行参数变化等情形下，均可获得良好的直流母线电压控制效果及准确的负荷电流分配。

关键词：直流微网；电压控制；负荷分配；自适应控制；小信号模型

中图分类号：TK81 **文献标志码**：A **文章编号**：1671–5292(2026)01–0095–11

0 引言

分布式发电以其经济、环保、拓展性强等优点得到了广泛应用。但分布式电源在接入配电网时会对局部电网的电能质量造成影响。以消纳本地负荷、整合分布式发电资源的微网成为可再生能源利用的升级方案[1–3]。微网存在交流微网与直流微网两种形式，交流微网便于接入现有配电网，但控制策略相对复杂；直流微网不存在无功功率、相位以及谐波等问题[4,5]，更适于各种直流终端负载的供电[6–8]。

可再生能源为基础的发电单元具有随机性及波动性。另外，小范围内的负荷所消耗的功率亦呈现出较强的随机性，两方面的随机性增加了微网实时功率控制的难度。而电流分配与电压稳定是实时功率平衡的基本要素，因此，负荷电流的分配与负荷接入母线的电压同步控制成为直流微网运行的基本任务。利用电压–电流、电压–功率关系构建的下垂控制技术，能够同步实现直流母线电压控制与负荷分配[9,10]。采用下垂控制的设备不依赖通讯，能够实现即插即用，整体微网呈现较高的可靠性及扩展性。但由于存在线阻，单一下垂控制会造成直流母线电压偏移及电流分配误差[11–13]，从而影响对负荷的供电质量及电源的运行效率。文献[14–16]在下垂控制器中引入虚拟电阻，通过虚拟电阻的动态变化改善稳态情形下的电流分配，并提高 DG 母线电压的控制精度。该类方法具有较强的自适应性，能够连续、实时地进行电流与电压的协调控制。但采用该方法时 DG 单元的换流器会频繁改变工作点，且对系统的数值计算能力要求较高。相比于实时变化下垂系数的虚拟阻抗法，分段线性化的方法将各单元工作区划分成少量且固定的区间，在每个工作区内保持恒定的下垂系数[5,17,18]。具备分段下垂控制的换流器仍然具备较好的自适应特性，在负荷重载、轻载及正常载荷情况下都具有良好的电流分配精度，并且对系统数值计算能力要求不高。但在负荷分段的拐点处下垂系数会发生突变，导致运行中换流器输出电流不连续以及公共直流母线电压不稳定。非线性下垂控制方法能够克服分段下垂控制的不足，下垂系数在不同载荷情况下连续变化[19–22]，对系统冲击较小。其本质是通过构建换流器输出电压与电流的非线性多项式表征连续变化的下垂系数。该类方法能够保证负荷在较大范围变动时获得良好的电流分配效果，但在接近空载及重载时效果较差。此外，可根据当前的运行状态，如 DG 单元的输出功率、负荷功率及线路参数等，采用优

收稿日期：2024–11–17。
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U1766201)。
通信作者：肖宏飞(1976–)，女，博士，教授，研究方向为新能源发电与利用、电力经济等。E–mail：xiaohf@hdu.edu.cn

化方法直接进行下垂系数的优化计算[23-25],电压补偿效果及电流分配效果都比较理想。但最优解的确定依赖系统的运行状态信息，占用较多的信息通道,增大系统实时通讯压力。

现有的改进下垂控制，在不同程度上可以获得良好的电流分配及 DG 母线电压控制效果,但不能对公共直流母线的电压进行有效控制，且部分方法过于依赖通讯网络。本文提出一种自适应的下垂控制，通过调节各变换器端电压补偿因线路阻抗产生的压降，以保证公共直流母线电压的稳定,并且使得各变换器按系统需求输出电流。本文对缺少调压设备支撑的公共直流母线电压与负荷分配的协调控制问题进行了研究，以形成对现有控制策略的必要补充。此外,所提的控制策略为针对 DG 单元的底层控制，不针对微网运行的上层控制。

1 直流微网的结构与模型

直流微网由多个 DG 单元及直流负荷组成。DG 单元包含光伏发电单元、蓄电池及燃料电池等。通常,光伏发电单元通过升压型单向功率变换器接入直流母线，蓄电池经双向变流器连接至直流母线。负荷的接入通常根据就近原则,接入 DG 母线或公共母线。出于对负荷供电质量的要求,有负荷接入的母线电压应该稳定，并且能够得到良好控制。同时,为了保证微网运行的经济性及稳定性,DG 单元的输出电流应该能够遵循微网系统的设定值。这就要求有负荷接入的母线电压及 DG 单元的输出电流都应可控。文献[11-25]均可完成负荷分配以及 DG 母线电压控制，但不能实现对公共直流母线电压的有效控制。本文对负荷接入公共直流母线的微网进行电压控制及负荷的分配研究,如图 1 所示。

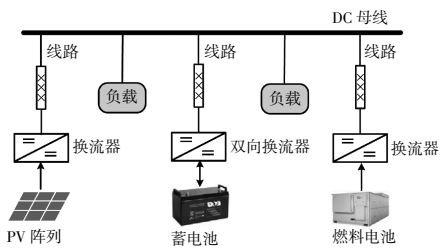


图 1 负荷接入公共直流母线的直流微网

Fig.1 Framework of DC microgrid as loads access to common bus

由图 1 可知,因公共母线未安装电源,其调节任务落实到 DG 单元。各 DG 单元的输出电压与其输出电流须具有耦合性，方可对其换流器进行控制。

微网中光伏阵列的输出电流-电压方程、蓄电池输出电压-电流方程及燃料电池输出电压-电流方程参考文献[26]。

2 自适应的下垂控制策略设计

直流微网中 DG 单元均采用下垂控制，其稳态等值电路如图 2 所示。

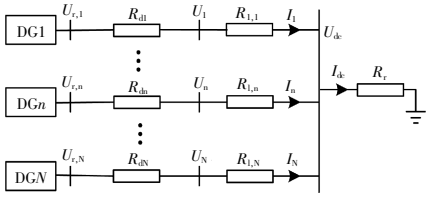


图 2 采用下垂控制的直流微网稳态等值电路

Fig.2 Steady state circuit of the DC microgrid based on droop control

根据图 2 及潮流特性可知：

$$U_{dc}=U_{r,n}-I_n(R_{dn}+R_{l,n}) \tag{1}$$

式中：U_{dc} 为公共直流母线电压；$U_{r,n}$ 为变换器 n 输出电压参考值；I_n 为变换器 n 的输出电流；R_{dn} 为变换器 n 的下垂系数；$R_{l,n}$ 为馈线 n 的电阻。

当各变换器输出电压参考值相等时，变换器输出电流的关系满足：

$$\frac{I_n}{I_m}=\frac{R_{dm}+R_{l,m}}{R_{dn}+R_{l,n}} \tag{2}$$

式中：I_m 为变换器 m 的输出电流；R_{dm} 为变换器 m 的下垂系数；$R_{l,m}$ 为馈线 m 的电阻。

由式(2)可知,各变换器输出电流与其输出电阻及线路电阻之和成反比关系。当输出电阻远大于线路电阻时,可忽略线路电阻,仅通过调节输出电阻即可实现负荷分配与电压控制。然而,当下垂系数较大时,虽然电流分配精度可得到有效保障,但会导致公共直流母线残留较大的电压偏差；而采用较小的下垂系数，一定程度上能降低母线电压偏差,但会导致电流分配精度偏低。因此,传统的下垂控制在实现高精度的电流分配与公共直流母线电压控制之间存在较大困难。

本文设计的自适应下垂控制策略，通过整定各 DG 单元的电流参考值及电压参考值进行负荷电流分配及公共直流母线电压控制。电流控制模块用以实现电流参考值整定，电压控制模块用以

实现公共直流母线电压参考值整定。结合图 2 可知,在所有电源均正常运行、线路无开断情况下,为保证 DG 输出电流与设定的比例一致,其电流参考值应为

$$I_{r,n}^{0}=\frac{U_{dc}^{*}}{R_r}f_n \tag{3}$$

式中:U_{dc}^{*} 为直流母线电压参考值;R_r 为直流母线负荷的等值电阻;$I_{r,n}^{0}$ 为变换器 n 的电流参考值;f_n 为 DG 单元 n 的负荷分配系数,$0\leqslant f_n\leqslant 1$。为保证全部分配负荷,$\sum f_n=1$。$f_n$ 由微网中央控制器整定,可以根据日前运行计划设置,或按换流器容量设置,或按所需的比例进行设定。

式(3)为全体可调用电源均参与负荷控制时的情形。当 DG 单元中的元件故障退出运行或线路开断时,无法送出功率。为此,须设计自动电流检测装置。当发生电流为 0 的情形时,自动修正各电源的电流参考值。各单元的电流修正量应与分配系数成正比,且与不平衡电流成正比,即:

$$\Delta I_{r,n}=\frac{U_{dc}^{*}}{R_r}\left[\sum_{i=1}^{N}f_i(1-a_i)\right]\frac{f_n a_n}{\sum_{i=1}^{N}f_i a_i} \tag{4}$$

式中:$\Delta I_{r,n}$ 为变换器 n 输出电流参考值的补偿量;a_n 为开关函数,换流器有电流输出时取 1,无电流时为 0。

联立式(3),(4),将电流参考值增量与原参考值叠加,得到统一电流参考值表达式为

$$I_{r,n}=\frac{U_{dc}^{*}}{R_r}\left(f_n+\frac{I_{r,n}^{0}a_n}{\sum_{i=1}^{N}I_{r,i}^{0}a_i}\right)-I_{r,n}^{0}a_n \tag{5}$$

当不存在线路开断或 DG 单元退出运行的情形时,所有开关系数均为 1,不平衡电流为零,式(5)退化成式(3)的形式;当电源故障停机或所连接线路跳闸,出现不平衡电流,剩余 DG 单元在新的边界条件下按设定的电流分配系数输出电流。当估算出某单元剩余容量不足时,中央控制器会将缺额部分功率转移至其它 DG 单元并重新整定分配系数。当所有电源容量之和均不能满足缺额功率时,所有单元满发并进行减负荷操作[27,28]。

结合微网稳态等值电路可知,当直流母线电压保持恒定时,线路首端电压,即 DG 单元母线电压等于直流母线电压与线路压降之和。DG 单元母线电压参考值在维持直流母线电压恒定的情况下,抵消线路电压降落及电流分配误差。因此各 DG 单元母线电压参考值应整定为

$$U_{r,n}=U_{dc}^{*}+I_{r,n}R_{l,n}+k_{p,n}^{i}(I_{r,n}-I_n)+k_{i,n}^{i}\int(I_{r,n}-I_n)\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中:$k_{p,n}^{i}$ 和 $k_{i,n}^{i}$ 分别为第 n 个 DG 单元电流控制器的 PI 参数。

按式(6)进行电压参考值整定,可以实现公共直流母线电压的恒定。结合式(5),(6)及图 2,可得 DG 单元的自适应控制策略如图 3 所示。

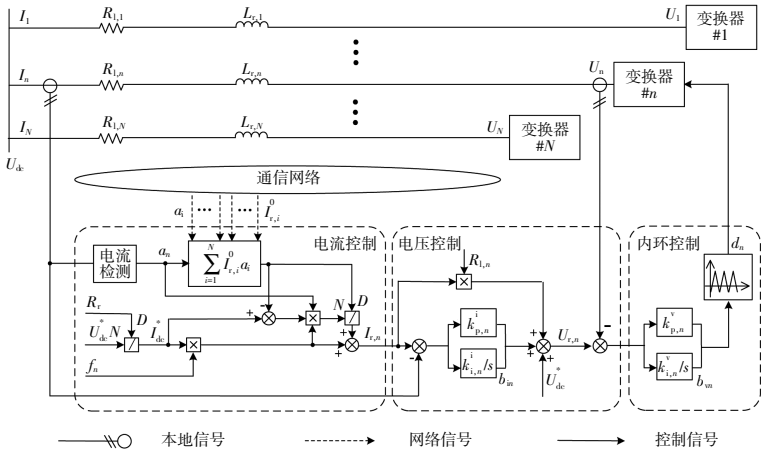


图 3　DG 单元的控制策略

Fig.3 Control Strategy for DG units

通过电流控制环整定电流参考值,可实现负荷分配功能。通过电压控制环整定 DG 单元的电压参考值,可实现公共直流母线电压的控制。内环控制生成变换器的驱动信号。当负荷发生变化时,

会反映在电流参考值上,进而影响电压参考值。即控制器会根据负荷变化自动整定新的电压参考值。电压控制环通过 PI 控制器可以调节 DG 单元的电流及电压，从而将直流母线电压实际值稳定在参考值。

3 微网小信号建模

根据小信号方程的特征矩阵判断微网系统的稳定性，第 n 个 DG 单元以及公共负荷的暂态等值电路如图 4 所示。

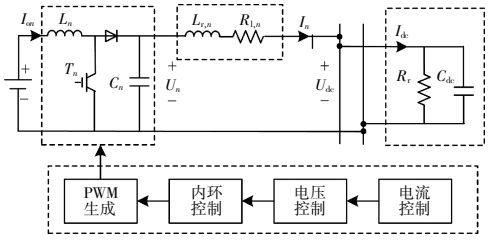


图 4 直流微网的暂态等值电路

Fig.4 Transient state equivalent circuit of DCmicrogrid

3.1 变换器的小信号模型

根据 DC/DC 变换器的开关导通及关断时的等效电路,在忽略其开关损耗、考虑电感内阻的情况下,可得其微分方程为

$$\begin{cases} C_n\dfrac{\mathrm{d}U_n}{\mathrm{d}t}=(1-d_n)I_{on}-I_n \\ L_n\dfrac{\mathrm{d}I_{on}}{\mathrm{d}t}=V_{on}-(1-d_n)U_n \end{cases} \tag{7}$$

式中:I_{on} 为 Boost 变换器的输入侧电感电流;U_{on} 为变换器输入电压;L_n,C_n 分别为变换器 n 的滤波电感及稳压电容;d_n 为变换器 n 的占空比,其表达式为

$$d_n=\frac{1}{M_n}\left[k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}}(U_{\mathrm{r},n}-U_n)+b_{\mathrm{v}n}\right] \tag{8}$$

式中:$k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}}$ 为电压环 PI 控制器的比例系数;$b_{\mathrm{v}n}$ 为电压环 PI 控制器积分项输出;M_n 为脉冲生成器输出的锯齿波峰值。

将式(5),(6)代入式(7),并在初始运行点附近线性化,得到变换器的小信号模型为

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\boldsymbol{x}_{1n}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{A}_{1n}\Delta\boldsymbol{x}_n+\boldsymbol{B}_{1n}\Delta U_{\mathrm{dc}} \tag{9}$$

式中:$\Delta\boldsymbol{x}_n$ 为状态变量,$\Delta\boldsymbol{x}_n=[\Delta U_n,\Delta I_{on},\Delta I_n,\Delta b_{\mathrm{v}n},\Delta b_{\mathrm{i}n}]^{\mathrm{T}}$;$\Delta\boldsymbol{x}_{1n}=[\Delta U_n,\Delta I_{on}]^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{A}_{1n}$,$\boldsymbol{B}_{1n}$ 为系数矩阵，表达式分别为

$$\boldsymbol{A}_{1n}=\begin{bmatrix} \dfrac{I_{on}^{0}k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}}}{C_nM_n} & \dfrac{1-d_n^{0}}{C_n} & \dfrac{I_{on}^{0}k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}}k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{i}}}{C_nM_n}-\dfrac{1}{C_n} & -\dfrac{I_{on}^{0}}{C_nM_n} & -\dfrac{I_{on}^{0}k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}}}{C_nM_n} \\ \dfrac{d_n^{0}-1}{L_n}-\dfrac{k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}}U_n^{0}}{L_nM_n} & 0 & -\dfrac{U_n^{0}k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}}k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{i}}}{L_nM_n} & \dfrac{U_n^{0}}{L_nM_n} & \dfrac{U_n^{0}k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}}}{L_nM_n} \end{bmatrix},\boldsymbol{B}_{1n}=[0\ \ 0]^{\mathrm{T}}。$$

上角标 0 表示变量在初始状态下数值。

3.2 线路的小信号模型

根据图 4 可知，线路暂态模型等效为 RL 串联电路,其微分方程为

$$L_{\mathrm{r},n}\frac{\mathrm{d}I_n}{\mathrm{d}t}=U_n-R_{\mathrm{l},n}I_n-U_{\mathrm{dc}} \tag{10}$$

式中:$L_{\mathrm{r},n}$ 为线路 n 的等值电感。

将式(10)在初始运行点附近线性化,可得变换器的小信号模型为

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\boldsymbol{x}_{2n}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{A}_{2n}\Delta x_n+\boldsymbol{B}_{2n}\Delta U_{\mathrm{dc}} \tag{11}$$

式中:$\Delta\boldsymbol{x}_{2n}=[\Delta I_n]$;系数矩阵 $\boldsymbol{A}_{2n}$,$\boldsymbol{B}_{2n}$ 分别为

$$\boldsymbol{A}_{2n}=\begin{bmatrix} \dfrac{1}{L_{\mathrm{r},n}} & 0 & -\dfrac{R_{\mathrm{l},n}}{L_{\mathrm{r},n}} & 0 & 0 \end{bmatrix},\boldsymbol{B}_{2n}=\begin{bmatrix} -\dfrac{1}{L_{\mathrm{r},n}} \end{bmatrix}。$$

3.3 控制器的小信号模型

根据图 3 中电压控制及电流控制模块,可得其微分方程为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}b_{\mathrm{v}n}}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{i},n}^{\mathrm{v}}(U_{\mathrm{r},n}-U_n) \\ \dfrac{\mathrm{d}b_{\mathrm{i}n}}{\mathrm{d}t}=k_{\mathrm{i},n}^{\mathrm{i}}(I_{\mathrm{r},n}-I_n) \end{cases} \tag{12}$$

式中:$b_{\mathrm{i}n}$ 为电流环 PI 控制器的积分项输出;$k_{\mathrm{i},n}^{\mathrm{v}}$,$k_{\mathrm{i},n}^{\mathrm{i}}$ 分别为电压环、电流环 PI 控制器的积分系数。

将式(5),(6)代入式(12),在稳态值附近线性化后,可得到控制器的小信号模型为

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\boldsymbol{x}_{3n}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{A}_{3n}\Delta x_n+\boldsymbol{B}_{3n}\Delta U_{\mathrm{dc}} \tag{13}$$

式中:$\Delta\boldsymbol{x}_{3n}=[\Delta b_{\mathrm{v}n},\Delta b_{\mathrm{i}n}]^{\mathrm{T}}$,系数矩阵 $\boldsymbol{A}_{3n}$,$\boldsymbol{B}_{3n}$ 分别为

$$\boldsymbol{A}_{3n}=\begin{bmatrix} -k_{\mathrm{i},n}^{\mathrm{v}} & 0 & -k_{\mathrm{i},n}^{\mathrm{v}}k_{\mathrm{p},n}^{\mathrm{v}} & 0 & k_{\mathrm{i},n}^{\mathrm{v}} \\ 0 & 0 & -k_{\mathrm{i},n}^{\mathrm{v}} & 0 & 0 \end{bmatrix},\boldsymbol{B}_{3n}=[0\ \ 0]^{\mathrm{T}}。$$

3.4 公共直流母线的小信号模型

根据图 4,并结合 KCL 定律,可得公共直流母线稳压电容的微分方程为

$$C_{dc}\frac{dU_{dc}}{dt}=\sum_{n=1}^{N}I_n-\frac{U_{dc}}{R_r} \tag{14}$$

式中:C_{dc}为公共直流母线稳压电容。

将式(14)在初始运行点附近线性化,可得到公共直流母线的小信号模型为

$$\frac{d\Delta U_{dc}}{dt}=\sum_{n=1}^{N}[\boldsymbol{A}_c\Delta x_n+\boldsymbol{B}_c\Delta U_{dc}] \tag{15}$$

系数矩阵$\boldsymbol{A}_c$,$\boldsymbol{B}_c$分别为$\boldsymbol{A}_c=\begin{bmatrix}0&0&\frac{1}{C_{dc}}&0&0\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{B}_c=\begin{bmatrix}-\frac{1}{C_{dc}R_r}\end{bmatrix}$。

3.5　直流微网的小信号模型

直流微网包括一个公共直流母线、若干线路、换流器及其控制器。联立式(9)~(15),可得直流微网系统小信号方程为

$$\Delta\dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{X} \tag{16}$$

式中:$\Delta\boldsymbol{X}$为状态变量,$\Delta\boldsymbol{X}=[\Delta x_1,\ \cdots\Delta x_n,\ \cdots\Delta x_N,\ \Delta U_{dc}]^T$;$\boldsymbol{A}$为特征矩阵,其表达式为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}A_{11}&&&&&B_{1r}\\&A_{22}&&0&&B_{2r}\\&&\ddots&&&\vdots\\&&&A_{nn}&&B_{nr}\\&0&&&\ddots&\vdots\\&&&&A_{NN}&B_{Nr}\\A_c&A_c&\cdots&A_c&\cdots&A_c\quad B_c\end{bmatrix} \tag{17}$$

式中:$\boldsymbol{A}_{nn}=\begin{bmatrix}A_{1n}\\A_{2n}\\A_{3n}\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{B}_{nr}=\begin{bmatrix}B_{1n}\\B_{2n}\\B_{3n}\end{bmatrix}$。

当特征矩阵中所有特征值位于S域左半平面时,表明该直流微电网系统是大范围渐进稳定的。

4　算例分析

4.1　时域仿真研究

4.1.1　光储直流微网仿真结果

光储直流微网系统由一个光伏发电单元、一个蓄电池组、一个燃料电池组和两个直流负荷组成,如图5所示。两个直流负荷均为连接在公共直流母线的恒阻型负荷。在初始运行状态下,Break1闭合,Break2断开;各单元电流分配系数分别为0.437 5,0.3125,0.25;恒阻型负载R_{L1}为10 Ω,R_{L2}为10 Ω;光照强度为700 W/m^2,气温为20 ℃;公共直流母线电压参考值为200 V。

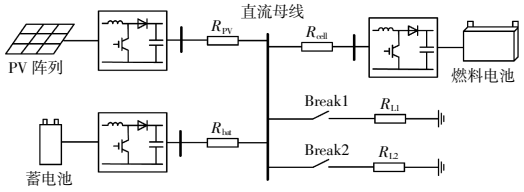


图5　光储直流微网系统结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of optical storage DC microgrid system

系统其余参数如表1所示。

表1　各元件参数

Table 1 Parameters of each element

单元	参数	数值
光伏单元	并联模块数/个	20
	串联模块数/个	9
	每个模块中并联数/个	6
	每个模块中串联数/个	6
	线路电阻R_{PV}/Ω	1
蓄电池单元	最大放电功率/kW	5
	容量/A·h	15
	额定电压/V	120
	线路电阻R_{bat}/Ω	0.9
燃料电池	最大输出功率/kW	4
	电池个数/个	60
	储氢量/L	7.9
	线路电阻R_{cell}/Ω	1.2
直流负荷	R_{L1}/Ω	10
	R_{L2}/Ω	10

仿真在3种工况下分别进行。①系统在初始运行条件下运行,200 s时改变光照强度变为600 W/m^2。②恢复系统初始运行条件,200 s时中央控制器将电流分配系数分别设置为0.333 4,0.333 3,0.333 3。③恢复系统初始运行条件,200 s时闭合Break2,投入负荷R_{L2}。3种工况下公共直流母线电压与各单元的输出电流如图6~8所示。

由图6~8可以看出,在各种工况下,直流母线稳态电压始终维持在200 V左右;除暂态过程中的电流冲击外,各单元实际输出电流均与当前时段的分配系数一致。所提的控制策略在气象条

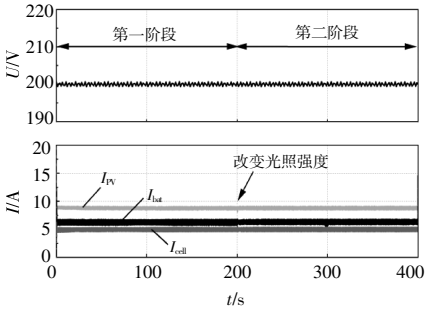


图6　光照强度改变时的仿真结果

Fig.6 Simulation results when the illumination intensity changes

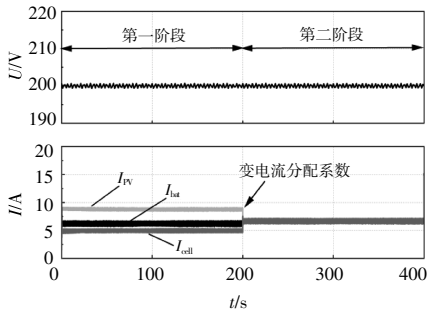


图 7　电流分配系数改变时的仿真结果

Fig.7 Simulation results when the current distribution coefficients change

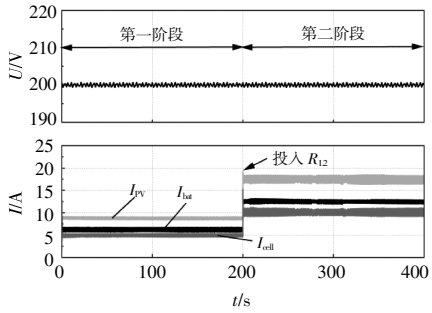


图 8　负荷突变时的仿真结果

Fig.8 Simulation results during load mutation

件、中央控制器指令及外部负荷发生变化时,均可实现稳定的直流母线电压控制与负荷分配。

4.1.2　4 DG 直流微网仿真结果

直流微网系统中 4 个电源均为理想电压源,采用 Boost 型换流器升压,经馈线连接至公共直流母线,结构如图 9 所示。

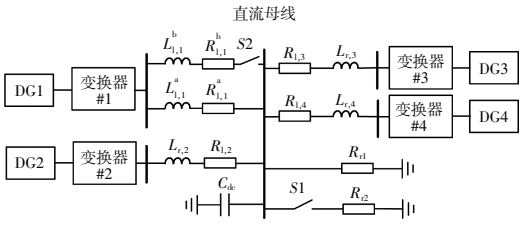


图 9　直流微网结构示意图

Fig.9 Structure diagram of the studied DC microgrid

恒阻型负荷及稳压电容连接在公共直流母线。在初始状态下,开关 S1 断开,S2 闭合;各 DG 的负荷分配系数分别为 0.348,0.174,0.261,0.217;恒阻型负载 R_{r1} 为 24 Ω,R_{r1} 为 72 Ω;稳压电容 C_{dc} 为 4 mF;公共直流母线参考电压为 200 V。

系统参数如表 2,3 所示。

表 2　直流微网系统参数

Table 2 System parameters of the studied DC microgrid

参数	DG1	DG2	DG3	DG4
C_n/mF	0.394	0.535	0.465	0.498
L_n/mH	0.428	0.168	0.32	0.265
$P_{r,n}$/kW	2	1	1.5	1.25
$R_{l,n}$/Ω	0.9	1.5	2	1.5
$L_{r,n}$/mH	0.25	0.35	0.2	0.2

表 3　运行变量初始值及控制器参数

Table 3 Initial valuesof variables and parameters of controllers

参数	DG1	DG2	DG3	DG4
$k_{p,n}^{v}$	0.01	0.01	0.01	0.01
$k_{i,n}^{v}$	0.4	0.4	0.4	0.4
$k_{p,n}^{i}$	0.000 01	0.000 01	0.000 01	0.000 01
$k_{i,n}^{i}$	16	200	10	200
I_{on}^{0}/A	6.734	6.828	6.862	6.947
M_n	5	5	5	5
U_n^0/V	203.495	202.922	205.834	203.644

本文分别在负荷突变、负荷分配系数变化、线路电阻及 DG 单元发生故障等 4 种工况下进行所提策略有效性验证。

①负荷突变

系统在初始条件下运行,3 s 时开关 S1 闭合,投入负荷 R_{r2};5 s 时断开 S1,切除 R_{r2}。公共直流母线电压与DG 单元的输出电流如图 10 所示。

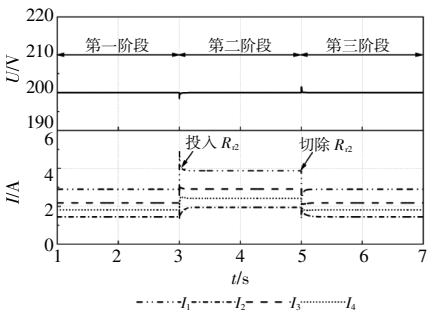


图 10　负荷突变时的仿真结果

Fig.10 Simulation results during load fluctuation

由图 10 可以看出,新负荷投入后,公共母线电压瞬时跌落后很快稳定于 200 V,各 DG 单元的输出电流迅速增大且稳定。切除负荷后公共母线电压短时增加后稳定于 200 V,各 DG 输出电流迅速下降并稳定。在不同稳定状态时,各 DG 输出电流分配比例均与设定的电流分配系数一致。

②负荷分配系数变化

恢复系统初始运行状态,3 s 时将 DG 单元的

电流分配系数整定为 0.3,0.2,0.3,0.2;5 s 时整定为 0.25,0.25,0.25,0.25，公共母线电压及 DG 输出电流如图 11 所示。

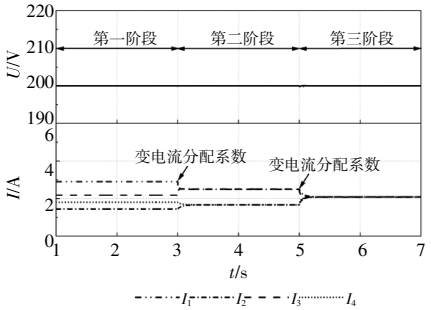


图 11　电流分配系数改变时的仿真结果

Fig.11 Simulation results as current distribution coefficientchanges

由图 11 可知,在整个过程中公共母线电压始终维持在 200 V。在第二阶段,DG 单元输出电流经短暂的暂态过程后稳定，实际电流分配比例分别为 0.301,0.199,0.299,0.201。在第三阶段,DG 单元实际输出电流比例分别为 0.249,0.251,0.250,0.250。各阶段均与设定的负荷分配系数接近,电流分配效果良好。

③线阻变化

恢复系统初始运行条件,在 3 s 时断开 S2,切除与 DG 1 相连的一条线路,5 s 时再次闭合 S2。假设各线路容量足够大，采用本文所提控制策略进行仿真,公共母线电压与 DG 输出电流如图 12 所示。

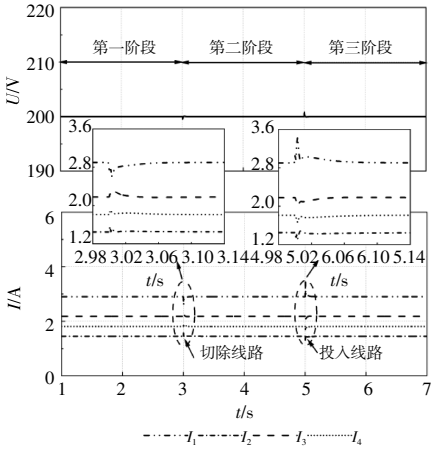


图 12　切除线路时的仿真结果

Fig.12 Simulation resultsas line switchs off

由图 12 可知,公共母线电压发生短暂、小幅波动迅速恢复到参考值，各单元输出电流发生瞬时改变,约 0.13 s 后稳定,其稳态输出电流比例与线路开断前相同,也与设定的系数一致。

④DG 故障

恢复初始运行条件，假设 3 s 时 DG4 发生故障退出运行,仿真结果如图 13 所示。

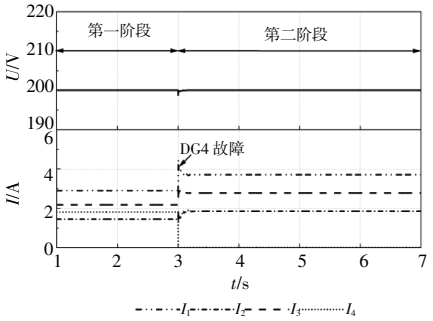


图 13　DG4 故障时的仿真结果

Fig.13 Simulation results as DG4 failure

由图 13 可知,当 DG4 退出运行后,3 个正常运行的单元按照各自的容量进行负荷分配，实际输出电流比例为 0.444,0.222,0.334,0。同时,公共直流母线电压在瞬时降落后迅速回升参考值。采用本文所提自适应控制策略后，在系统备用充足的情况下,若有意外退出运行的机组,负荷可在剩余单元间进行分配，同时维持公共直流母线电压稳定,且调节过程无需进行人工干预。

4.2　稳定性分析

本文对 4DG 的直流微网系统进行稳定性分析。根据式(16)建立微网系统小信号方程,并结合系统初始状态下的状态变量初值及参数，可得系统的特征根,如表 4 所示。系统所有特征根均位于 S 域左半平面，表明采用所提的控制策略进行电压控制时,微网系统在初始运行状态下是稳定的。

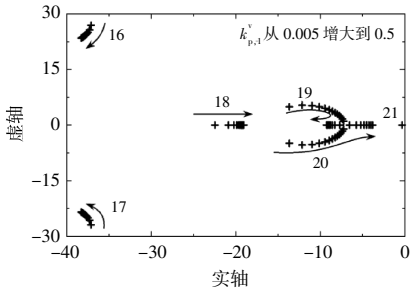
表 4　系统特征根

Table 4 System characteristic roots

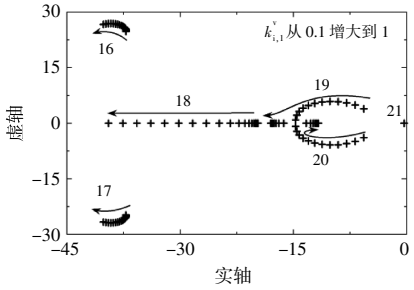
序号	特征根	序号	特征根	序号	特征根
1	−8 023.2	8	−11.7−1 232i	15	−56.8−19.4i
2	−2 947.7+6 007.5i	9	−1 143.1	16	−37.3+25.7i
3	−2 947.7−6 007.5i	10	−627.5+1 288.6i	17	−37.3−25.7i
4	−4 149.7	11	−627.5−1 288.6i	18	−20.9
5	−1 591.1+2 232.2i	12	−750.9+1 223.6i	19	−12.2+5.4i
6	−1 591.1−2 232.2i	13	−750.9−1 223.6i	20	−12.2−5.4i
7	−11.7+1 232i	14	−56.8+19.4i	21	−0.3

图 14 为保持系统其他参数不变的情况下,只改变 DG1 的电压控制环的比例、积分系数时主导特征根的轨迹。

由图 14(a)可知,当 $k_{p,1}^{v}$ 从 0.005 增大到 0.5



(a)比例系数变化



(b)积分系数变化

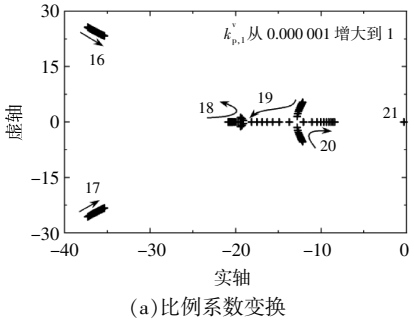
图 14 电压环 PI 参数变化时的根轨迹

Fig.14 Traces of dominant eigenvalues as $k_{p,1}^{v}$ and $k_{i,1}^{v}$ change

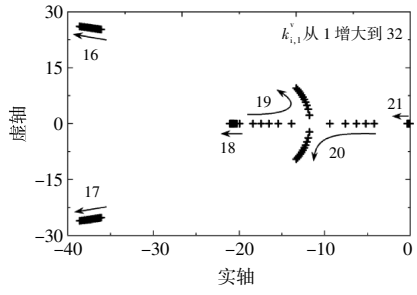
时,主导极点 21 几乎不移动;特征根 16,17 及 19 总体呈向左移动趋势;18,20 均向右移动。图 14(b)中,$k_{i,1}^{v}$从 0.1 增大到 1 时,特征根 21 基本不移动;16,17,18 及 19 总体呈向左移动趋势;20 先向左半平面移动后向右移动。可见,DG1 电压控制环的比例、积分系数在变化过程中,系统始终保持稳定的,但稳定裕度有所改变。

图 15 为保持系统其他参数不变的情况下,只改变 DG1 的电流控制环的比例、积分系数时主导特征根的轨迹图。

由图 15 可知,电流控制环的比例、积分系数增大时,系统特征根始终在虚轴左侧,系统保持稳定的。但增大$k_{p,1}^{v}$在一定程度上减小系统的稳定裕度,而增大 $k_{i,1}^{v}$可以增大系统稳定裕度。因此,从系统运行的稳定性出发,在设计控制器时可适当提高电流环比例系数。



(a)比例系数变换



(b)积分系数变换

图 15 电流环 PI 参数变化时的根轨迹

Fig.15 Traces of dominant eigenvalues as $k_{p,1}^{v}$ and $k_{i,1}^{v}$ change

4.3 对比分析

为了验证所提控制策略的性能,本文分别与传统下垂控制、分段线性下垂控制[17]以及非线性下垂控制[19]进行了时域仿真的对比分析。其中,非线性下垂采用抛物线多项式构建 U–I 关系式。测试对象采用 4.1.2 节的微网系统。为测试各种方法在极端负载情况下的稳态特性,设置轻载和重载两种情形进行仿真。轻载时将 R_{rl} 设置成 30 Ω,重载时 R_{rl} 为 14 Ω。为更加直观地对比各策略的控制效果,分别定义公共直流母线电压稳态偏差 dU 和 DG 单元的稳态电流相对分配误差 dI_i 为

$$\mathrm{d}U=U_{dc}^{*}-U_{pcc} \tag{17}$$

$$\mathrm{d}I_i=\frac{I_i/\sum_{j=1}^{N}I_j-f_i}{f_i} \tag{18}$$

直流母线稳态电压及 DG 单元电流分配误差如表 5 及图 16,17 所示。

表 5 各种控制策略下的稳态电压

Table 5 Steady-state voltage under the various control strategies V

控制策略	轻载		重载	
	U_{pcc}	dU	U_{pcc}	dU
传统下垂	198.076 8	1.923 2	190.715 8	9.284 2
文献[17]	198.076 8	1.923 2	191.554 1	8.445 9
文献[19]	201.587 5	−1.587 5	191.459 5	8.540 5
本文方法	200.005 0	−0.005 0	200.008 0	−0.008 0

根据表 5,图 16,17 可知,所提控制策略在轻载和重载条件下均表现出良好的控制效果,母线电压稳态偏差及稳态电流分配误差均较小。其中,轻载时,传统下垂控制和文献[17]所提策略的控制性能基本相同,文献[19]所提策略的电流分配精度较差。重载时,传统下垂控制的公共直流母线

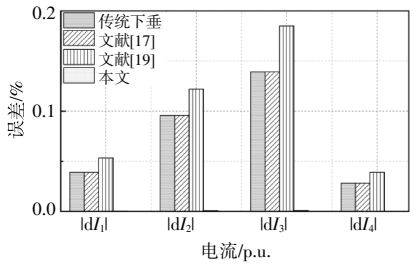


图 16　轻载时的电流相对误差

Fig.16 Relative current error at light load

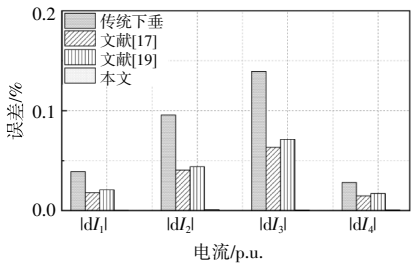


图 17　重载时的电流相对误差

Fig.17 Relative error of the current during overloading

电压控制效果和电流分配精度均是最差的。综合而言,所提控制策略与以上所列举的方法相比,其电流分配精度和公共直流母线电压控制之间是最平衡的,在整个变负荷过程中,均表现较为良好的控制效果。

5　结束语

本文对直流微网实时电压控制进行了研究,提出了一种自适应的下垂控制策略。所提控制策略能够同时实现公共母线电压的恒定控制及DG输出电流的分配,在多种运行条件下均具有良好的稳态性能。采用所提策略可根据系统运行需求设定负荷分配比例,扩大了电源输出功率的可调度区间,提升了微网运行的灵活性。此外,所提策略占用的通讯通道较少,对通讯网络依赖度较低。

参考文献:

[1] Hatziargyriou N, Asand H, Iravani, et a1. Microgrids [J]. IEEE Power and Energy Magazine,2007,5(4):78-94.

[2] Loh PC,Li D,Chai Y K,et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(5):2214-2223.

[3] Lasseter R H. Smart distribution: coupled microgrids[J]. Proceedings of the IEEE,2011,99(6):1074-1082.

[4] 周雪松,周泳良,马幼捷.基于降阶线性扩张状态观测器的风电并网逆变器线性自抗扰控制[J].电测与仪表,2023,60(8):157-163

[5] 杨帆,卫水平,任意,等. 变权-混合决策评估的复合功能并网逆变器多目标协同优化控制方法[J]. 中国电力,2024,57(3):113-125.

[6] Xiang X, GuY, QiaoY, et al. Resonant modular multilevel DC-DC converters for both high and low step-ratio connections in MVDC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2021,36(7):7625-7640.

[7] RyuM-H,KimH-S,BaekJ-W,et al. Effective test bed of 380-VDC distribution system using isolated power converters[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2015,62(7):4525-4536.

[8] DíazE R,SuX,SavaghebiM,et al. Intelligent DC microgrid living laboratories -aChinese -Danish cooperation project [A].2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids [C].Atlanta:IEEE,2015.65-370.

[9] HuangH-H,HsiehC-Y,LiaoJ-Y,et al. Adaptive droop resistance technique for adaptive voltage positioning in boost DC-DC converters[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(7):1920-1932.

[10] Khorsandi A,Ashourloo M,Mokhtari H. Adecentralized control method for a low-voltage DC microgrid[J].IEEE Transactions on Energy Conversio,2014,29 (4):793-801.

[11] Islam S,Agarwa l S,Shyam A B, et al. Ideal current-based distributed control to compensate line impedance in DC microgrid[J].IET Power Electronics,2018,11(7):1178-1186.

[12] Cingoz F, Elrayyah A,Sozer Y. Optimized settings of droop parameters using stochastic load modeling for effective DC microgrids operation [J].IEEE Transactions on Industry Applications,2017,53(2):1358-1371.

[13] 曾浩,赵恩盛,周思宇,等.基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):11-21.

[14] 耿英明,侯梅毅,朱国防,等.基于虚拟阻抗的微电网有功均分阻性下垂控制策略 [J]. 电力自动化设备,2020,40(10):132-138.

[15] Jiang Y,Yang Y,Tan S C,et al.Adaptive current sharing of distributed battery systems in DC microgrids using adaptive virtual resistance-based droop control [A].2019 IEEE Energy Conversion Congress and

Exposition (ECCE) [C].Baltimore:IEEE,2019.4262 - 4267.

[16] Augustine S, Mishra M K and Lakshminarasamma N. Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low -voltage standalone DC microgrid [J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2015,6(1):132-141.

[17] Lin Y, Xiao W.Novel Piecewise linear formation of droop strategy for DC microgrid[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(6):6747-6755.

[18] Zhao P,Liu Z,Zhao Y,et al. An adaptive piecewise droop control strategy for DC microgrids [A].2021 IEEE Fourth International Conference on DC Microgrids (ICDCM)[C].Arlington:IEEE,2021.1-6.

[19] Prabhakaran P,Goyal Y,Agarwal V. Novel nonlinear droop control techniques to overcome the load sharing and voltage regulation issues in DC microgrid[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(5):4477-4487.

[20] 李会新,陈祥文,金明亮,等.常规直流逆变站交流送出线路距离保护适应性分析与对策[J].中国电力,2024,57(2):115-126.

[21] Khorsandi A,Ashourloo M,Mokhtari H,et al.Automatic droop control for a low voltage DC microgrid [J].IET Generation,Transmission & Distribution,2016,10(1):41-47.

[22] Chen F,Burgos R,Boroyevich D, et al. Investigation of nonlinear droop control in DC power distribution systems: load sharing,voltage regulation,efficiency,and stability [J].IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(10):9404-9421.

[23] Sharma S,Iyer V M,Bhattacharya S.A load profile based optimized piecewise droop control for DC microgrids[A].2021 IEEE Fourth International Conference on DC Microgrids(ICDCM)[C].Arlington:IEEE,2021.1-6.

[24] Ingle A,ShyamA B,Sahoo S R,et al.Quality -index based distributed secondary controller for a low-voltage DC microgrid [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(9):7004-7014.

[25] Cingoz F,Elrayyah A,Sozer Y.Optimized settings of droop parameters using stochastic load modeling for effective DC microgrids operation [J].IEEE Transactions on Industry Applications,2017,53(2):1358-1371.

[26] Zhang X,Pei W,Mei C,et al.Transform from gasoline stations to electric-hydrogen hybrid refueling stations: An islanding DC microgrid with electric -hydrogen hybrid energy storage system and its control strategy[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2022,136:107684.

[27] 肖宏飞,黄锦锋,陈鑫,等.基于动态负荷分配的直流微电网电压控制策略 [J]. 电力自动化设备,2021,41(8):55-61.

[28] Xiao H,Liu G,Huang J,et al.Parameterized and centralized secondary voltage control for autonomous microgrids [J].International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2022,135:107531.

Load sharing and common bus voltage control strategy for DC microgrid

Chen Yafei[1,2], Xiao Hongfei[3], Chen Leilei[4], Zhou Dong[1], Wu Chenxi[1]

(1.School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2.Zhejiang Fangyuan Electrical Equipment Testing Co.,Ltd., Jiaxing 314001, China; 3.College of Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 311305, China; 4.School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: U-I droop schemes possess excellent adaptability and scalability, which is suitable for voltage control and load sharing of autonomous DC microgrids. However, it has not been given how to make a trade-off between the steady-state errors of the common bus voltage control and the accuracy of load sharing. The paper presents an adaptive control scheme for autonomous DC microgrids. The proposed scheme is accomplished by voltage reference regulation combined with current reference regulation. The small signal model of the microgrid under the proposed scheme is formed for the stability analysis. Simulation results show that the load is shared among DG units at the desired ratio and the voltage of common bus is restored accurately by the proposed scheme during load fluctuation, DG unit fault and change of system parameter.

Keywords: DC microgrid; voltage control; load distribution; adaptive control; small-signal modeling