

微电网并网逆变器的改进下垂控制策略研究

杨海柱 徐锦举

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 采用下垂法下垂系数的确定是个很大的难题。下垂系数很小,动态响应速度变慢;增大下垂系数可以改善动态响应,但是频率和电压幅值会大幅度偏离设定值,造成系统的不稳定,这种矛盾很难调和。本文提出了分段滞环的下垂控制策略,用三条斜率较大的下垂曲线代替一条斜率较小下垂曲线,使用此方法既可以解决动态响应的问题又可以增加功率输出范围而保持输出幅频不会变化太大。最后让此控制策略与传统的下垂控制策略相比较,比较结果证明了该策略的可行性和优越性。

关键词: 微电网;下垂控制;分段滞环;下垂系数

中图分类号: TM727 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 407.4047

Research of improved droop control strategy for grid-connected inverters in microgrids

Yang Haizhu Xu Jinju

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University,
Jiaozuo 454000, China)

Abstract: It is a big problem to determine the droop coefficient when using the droop method. The droop coefficient is small and dynamic response speed is slow; increasing the droop coefficient can improve the dynamic response, but the amplitude of the frequency and the voltage can deviate significantly from the setting value, resulting in the instability of the system, so it is difficult to reconcile the contradictions. This paper presents the droop control strategy of piecewise hysteresis, instead of a sag curve with three sag curve, using this method can not only solve the problem of dynamic response but also can increase the power output range and keep the output of the voltage amplitude and frequency not changing too much. Finally let the subsection hysteresis droop control strategy compared with the traditional droop control strategy, the comparison results prove the feasibility and superiority of this strategy.

Keywords: microgrids; droop control; subsection hysteresis; droop coefficient

1 引言

将光伏、风能等分布式电源以微网的形式接入到大电网或者是独立运行是一种发挥分布式电源发电供电非常有效的方式^[1-2]。在独立运行时一般采用对等控制策略,对等控制策略中各个微源仅根据接入点的就地信息进行控制,无需通信就可以增加控制的可靠性,所以备受关注,该控制策略多采用下垂控制方法^[3-7]。微电网采用下垂控制策略是以牺牲电网中电压和频率为代价的,特别是当微网中出现负载大幅度改变时,频率和电压的幅值会发生大幅度变化,这对电压和频率要求较高的电气设备来说是不允许的^[8]。因此需要对频率和电压的幅值进行限制。由于频率和电压幅值波动范围受限制,使得在大负荷情况下,下垂系

数很小,微源不能及时改变出力,响应速度慢;如果增大下垂系数以改善动态性能,又会使输出电压偏离额定范围,因此下垂系数的选取必须能够缓解使用下垂法的性能调节和功率输出范围的固有矛盾,但二者很难调和^[9-12]。文献[11,13]采用的是传统下垂控制对分布式电源进行控制,孤岛运行时采用下垂控制很容易发生电压幅值和频率的大幅度偏移;文献[14]虽然可以保证系统输出频率和电压幅值在设定范围内波动但是也限制了输出功率的大小。针对上述下垂控制方法的不足,本文提出了分段滞环下垂控制策略。使用该策略可以解决功率输出在较大的范围变化同时,系统可以保持较大的下垂系数而频率和电压幅值在较窄的范围之内波动,解决了电压调节性能和功率输出范围受限制的固有矛盾。最后在 MATLAB/Simulink 中建立

下垂控制策略微电网模型,并让分段滞环下垂控制策略与传统下垂控制策略进行对比,经过对比验证了本策略的优越性与可行性。

2 传统下垂控制策略

微网中对等控制常采用 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制策略,下面以 $P-f$ 和 $Q-V$ 特性曲线分析其原理。设有功和无功率由 A 点流向 B 点,如图 1 所示。

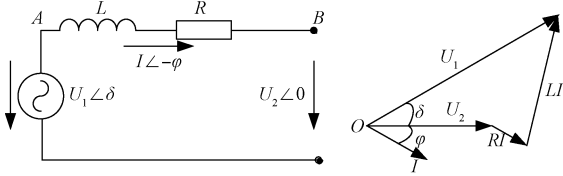


图 1 功率流动及向量示意图

从 A 点流向 B 点的有功功率和无功功率可表示为:

$$\begin{cases} P = \frac{U_2}{R^2 + X^2} [R(U_1 \cos \delta - U_2) + XU_1 \sin \delta] \\ Q = \frac{U_2}{R^2 + X^2} [RU_1 \sin \delta + X(U_1 \cos \delta - U_2)] \end{cases} \quad (1)$$

在线路阻抗比很小的情况下,近似有 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$ 则上述方程可以写成:

$$\begin{cases} P = \frac{U_1 U_2}{X} \delta \\ Q = \frac{U_1 U_2 - U_2^2}{X} \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可以看出有功功率的传输主要取决于角功 δ , 无功功率的传输主要取决于微源的输出电压 U_1 。由于角频率 ω 的积分即为相角 δ , 且 $\omega = 2\pi f$, 则每个运行状态均应对应一组不同的等式, 有:

$$\begin{cases} f = f_n - a(P - P_n) \quad (0 \leq P \leq P_{\max}) \\ V = V_n - bQ \quad (Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_n 和 P_n 分别为参考频率和参考有功功率, V_n 和 Q_n 分别为参考电压幅值大小和参考无功功率, a, b 分别为有功下垂系数和无功下垂系数。图 2 所示为传统下垂特性曲线原理图, 图 2 中 f_{\max} 和 f_{\min} 分别为微源输出频率最大值和最小值, V_{\max} 和 V_{\min} 分别为输出电压幅值最大值和最小值, 随着负载有功功率增加, 系统输出频率会变小, 反之频率变

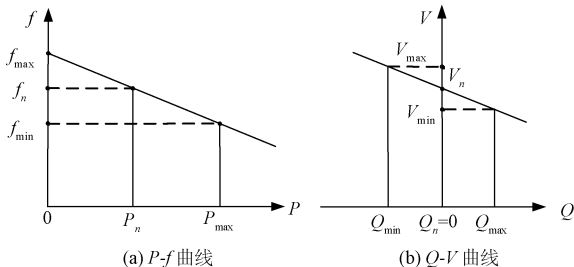


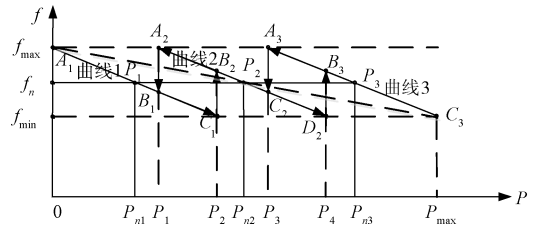
图 2 传统下垂控制特性曲线原理

大;随着负载无功功率增加系统输出电压幅值会减少,反之电压幅值变大。

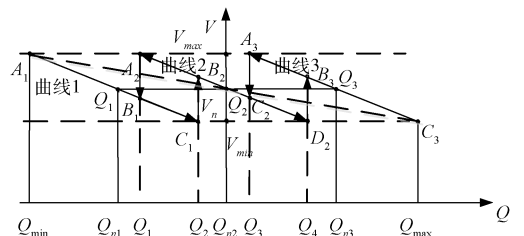
传统下垂控制策略的缺点是下垂系数的选取必须能够缓解使用下垂法的性能调节和功率输出范围的固有矛盾, 大负荷情况下, 下垂系数很小动态响应慢, 如果增大下垂系数以改善动态性能, 又会使输出电压偏离额定值, 这就需要合理的选择下垂系数^[12]。

3 分段滞环下垂控制策略

为了克服传统下垂控制策略的缺点, 本文提出分段滞环下垂控制策略, 其方法是使用 3 条斜率较大的下垂特性曲线代替 1 条下垂系数较小的下垂特性曲线, 如图 3 中依次向右且相互平行的 3 条曲线。随着输出功率的增加或者减少, 系统的工作点会在 3 条特性曲线上移动。采用滞环控制可以保证微电网输出功率在临界值时, 输出频率和电压不会频繁跳动。采用分段滞环控制策略时可以选取较大的下垂系数, 这样可以大大提高动态响应, 由于增加 2 段曲线, 可以保证输出功率大幅度增加时, 电压幅值和频率不会偏离设定范围, 这样就解决了采用下垂法的矛盾。



(a) $P-f$ 曲线



(b) $Q-V$ 曲线

图 3 分段滞环下垂控制特性曲线原理

图 3 为采用分段滞环下垂控制策略原理图, 图 3 中 $P-f$ 和 $Q-V$ 控制都采用的是分段滞环控制, 主要特点就是用 3 条下垂斜率较大的下垂特性曲线 A_1C_1, A_2C_2 和 A_3C_3 代替 1 条下垂斜率较小的下垂特性曲线 A_1C_3 。以 $P-f$ 控制为例进行说明, 假定初始时刻系统工作在 P_1 点, 此时系统输出功率为 P_{n1} , 频率输出为 f_n , 系统输出功率改变时频率的输出沿着曲线 1 上下移动。当负载增加时经过 B_1 到 C_1 此时工作点从 C_1 点跳到了 B_2 点, 此时系统频率输出的变化随功率的输出变化沿曲线 2 移动, 接下来系统的输出功率可能会增加也可能会减少, 当系统输出功率继续增加, 功

率输出到达 E_2 点时,系统工作点会跳到曲线 3 上,而当系统输出功率减小时,系统工作点不会直接从 B_2 跳到 C_1 ,而是沿着曲线 2 到达 A_2 点时,系统工作点从 A_2 到达 B_1 再次跳到曲线 1 上。同理当系统工作点在曲线 2 和曲线 3 之间跳跃时工作原理是一样的。因此由曲线 1、曲线 2、曲线 3 三条曲线和 $B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow B_2 \rightarrow A_2 \rightarrow B_1$ 、 $C_2 \rightarrow D_2 \rightarrow B_3 \rightarrow A_3 \rightarrow C_2$ 两个滞环共同构成了分段式滞环 $P-f$ 下垂控制策略。同理对 $Q-V$ 下垂控制也采用分段控制,其分析过程和 $P-f$ 下垂控制一样。

式(4)所示为系统有功功率和无功功率增加和减少时频率和电压的对应输出表达式。式(4)中存在 1 个 $P-f$ 和 1 个 $Q-V$ 函数输出表达式,但每个表达式都对应 2 个不同的定义域 $A1$ 和 $B1$ 与 $A2$ 和 $B2$,该定义域选取的原则是由系统输出频率和电压波动范围及下垂控制系数决定的。这是由于滞环的存在,当系统有功功率和无功功率增加和减少时表达式对应的定义域区间是不一样的。其中定义域 $A1$ 和 $A2$ 为系统输出功率增加时频率和电压函数表达式对应的定义域区间,定义域 $B1$ 和 $B2$ 为系统输出功率减小时频率和电压函数表达式对应的定义域区间。

$$\left\{ \begin{array}{l} f = \begin{cases} f_n - a(P - P_{n1}) \\ f_n - a(P - P_{n2}) \\ f_n - a(P - P_{n3}) \end{cases} \\ \left. \begin{array}{l} (0 \leq P \leq P_2) \\ (P_2 \leq P \leq P_4) (A1) \\ (P_4 \leq P \leq P_{max}) \end{array} \right\} \\ \left. \begin{array}{l} (0 \leq P \leq P_1) \\ P_1 \leq P \leq P_3 (B1) \\ P_3 \leq P \leq P_{max} \end{array} \right\} \\ V = \begin{cases} V_n - b(Q - Q_1) \\ V_n - bQ \\ V_n - b(Q - Q_3) \end{cases} \\ \left. \begin{array}{l} (Q_{min} \leq Q \leq Q_2) \\ (Q_2 \leq Q \leq Q_4) (A2) \\ (Q_4 \leq Q \leq Q_{max}) \end{array} \right\} \\ \left. \begin{array}{l} Q_{min} \leq Q \leq Q_1 \\ Q_1 \leq Q \leq Q_3 (B2) \\ Q_3 \leq Q \leq Q_{max} \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (4)$$

4 建模仿真和分析

4.1 建模仿真

使用分段滞环下垂控制策略,在 MATLAB/Simulink 环境中建立下垂控制仿真模型,并根据实际情况设定相应的参数,同时为了验证文中所提策略的优越性,同时建立传统下垂控制微网模型,并让两种模型的输出结果相对比。图 4 所示为示例微网结构图,图 4 中分布式电源 DG 采用下垂控制,微网中有 3 个负载,load1,load2 和 load3,其中 load1 离微源比较近,load2 和 load3 离微源稍远,最后微电网通过公共端接入 10 kV 配电网。

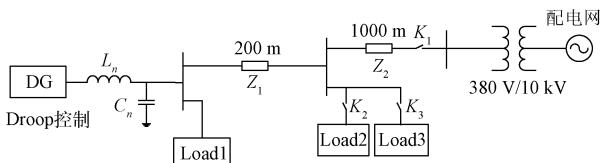


图 4 示例微网结构图

表 1 示例微电网模型参数设定值表

参数名称	参数设定
微源	VDC=800 V, $L_n=0.6 \times 10^{-3}$ H, $C_n=1.5 \times 10^{-3}$ F,
大下垂控制系数	$a=1 \times 10^{-5}, b=3 \times 10^{-4}$,
小下垂控制系数	$a=0.5 \times 10^{-5}, b=1.5 \times 10^{-4}$,
参考值	$P_{n1}=20$ kW, $P_{n2}=45$ kW, $P_{n3}=70$ kW, $f_n=50$ Hz, $V_n=311$,
频率波动范围	50 ± 0.2 Hz
电压波动范围	311 ± 10 V
滞环关键点 (有功)	第 1 个滞环 $B1(2.5 \times 10^4, 49.98)$ 、 $C1(4.0 \times 10^4, 49.8)$ 第 2 个滞环 $C2(5.0 \times 10^4, 49.98)$ 、 $D2(6.5 \times 10^4, 49.8)$ $B3(6.5 \times 10^4, 50.02)$ 、 $A3(5.0 \times 10^4, 50.2)$
滞环关键点 (无功)	第 1 个滞环 $B1(-3.34 \times 10^4, 309)$ 、 $C1(-0.7 \times 10^4, 301)$ 第 2 个滞环 $B2(-0.7 \times 10^4, 313)$ 、 $A2(-3.34 \times 10^4, 321)$ $D2(3.3 \times 10^4, 301)$ $B3(3.3 \times 10^4, 313)$ 、 $A3(0.66 \times 10^4, 321)$
负载	load1= $2.5 \times 10^4 + j4 \times 10^4$, load2= $2.5 \times 10^4 + j2.5 \times 10^4$, load3= $2.0 \times 10^4 + j15 \times 10^4$
线路 ^[15]	$Z_1=0.012 + j0.0380 \Omega$, $Z_2=0.06 + j0.191 \Omega$

假定实际中电网中频率最大偏移范围为 ± 0.2 Hz,电压偏移范围是 ± 10 V,根据这个假定条件设定分段滞环下垂控制策略中各个参数。表 1 所示为示例微电网模型参数设定值表,表 1 中设定了包括微源、下垂控制系数、频率和电压波动范围、有功和无功滞环关键点坐标、负载和线路在内的所有参数。表 2 所示为示例微网动作设置表,表 2 中设置仿真时间为 3 s,每隔 0.2 s 进行一次开关切换,具体切换时间和微网所处状态如表 2 时间(时刻)栏和状态栏所示。

4.2 微网系统功率输出结果分析

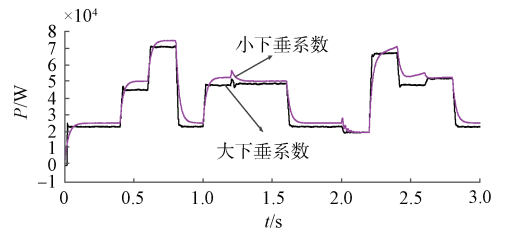
根据表 1 和 2 设置,图 5 所示为不同下垂系数功率输出对比图。从图 5 中可以看出,当微网中有功或无功负载增加时,对应输出功率曲线随之上升,反之输出功率会下降。从图中可以得到无论是 有功输出增加时刻(0.4 s、0.6 s、1.0 s、2.2 s)还是减少时刻(0.8 s、1.6 s、2.4 s、2.8 s)采用小下垂系数模型的动态响应速度明显比大下垂系数响应速度慢,所以采用大下垂系数有利于提高微电网动态响应。

表2 示例微网模型动作设置

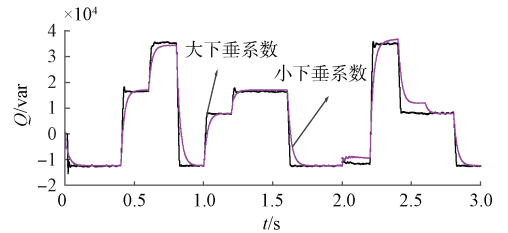
时间(时刻)/s	动作	状态
0~0.4		load1 运行,孤岛运行
0.4	K2 闭合	过渡状态
0.4~0.6		load1 和 load2 运行, 孤岛运行
0.6	K3 闭合	过渡状态
0.6~0.8		load1,load2 和 load3 运行, 孤岛运行
0.8	K2,K3 都断开	过渡状态
0.8~1.0		load1 运行,孤岛运行
1.0	K3 闭合	过渡状态
1.0~1.2		load1 和 load3 运行, 孤岛运行
1.2	K2 闭合,K3 断开	过渡状态
1.2~1.6		load1 和 load2 运行, 孤岛运行
1.6	K2 断开	过渡状态
1.6~2.0		load1 运行,孤岛运行
2.0	K1 闭合	过渡状态
2.0~2.2		load1 运行,并网运行
2.2	K2,K3 闭合	过渡状态
2.2~2.4		load1,load2 和 load3 运行, 并网运行
2.4	K2 断开	过渡状态
2.4~2.6		load1, load3 运行, 并网运行
2.6	K1 断开	过渡状态
2.6~2.8		load1, load3 运行, 孤岛运行
2.8	K3 断开	过渡状态
2.8~3		load1 运行,孤岛运行

4.3 微网系统频率输出结果分析

虽然大下垂系数有利于提高动态响应速度,但是也限制了功率输出范围,但采用分段滞环下垂控制可以解决这个问题。图6为仍根据表1和2设置且都采用大下垂系数时的分段滞环下垂控制和传统下垂控制频率输出对比图。从图6中得到由于传统下垂控制策略没有采用分段滞环控制所以在0.4s、0.6s、1.2s和2.2s时系统有功功率增加,输出频率会随着有功输出功率增加一直减小,在最小出接近49.4 Hz,远远偏移设定值50 Hz,而采用分段滞环下垂控制时,每当频率低于下限值时,系统工作点会跳跃到另外1条曲线上,即系统工作点在3条曲线上移动,可以保证系统频率的工作在指定的 50 ± 0.2 Hz,保证了微网运行的可靠性与稳定性,从而证明了本策略的可行性和优越性。



(a) 大下垂系数和小下垂系数输出有功功率对比



(b) 大下垂系数和小下垂系数输出无功功率对比

图5 不同下垂系数功率输出对比图

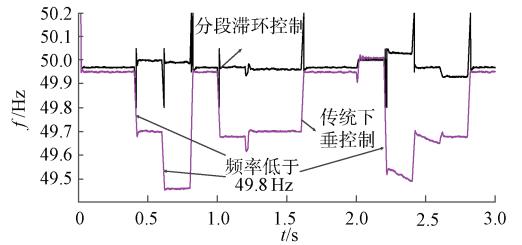
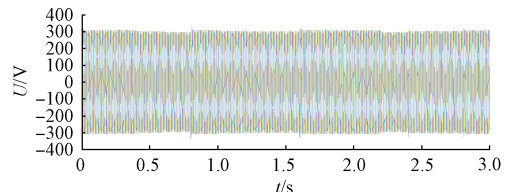


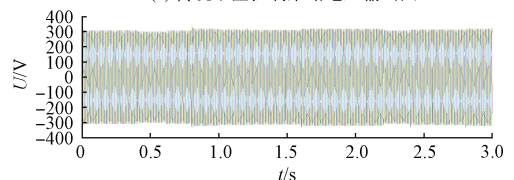
图6 分段滞环下垂策略和传统下垂控制策略频率输出对比图

4.4 微网系统电压输出结果分析

图7所示为大下垂系数条件下由Q-V特性曲线得到的微网系统输出电压波形图,其中图7(a)为使用传统下垂控制策略系统输出电压波形图,图7(b)为分段滞环下垂控制策略系统输出电压波形图。由于图7曲线输出不太清晰,图8(a)和(b)分别为图7(a)和(b)的局部放大图。对比图8两个图,当在0.4~0.8s、1.0~1.6s和2.2~2.4s时



(a) 传统下垂控制策略电压输出图



(b) 分段滞环下垂控制策略电压输出图

图7 两种下垂控制策略电压输出图

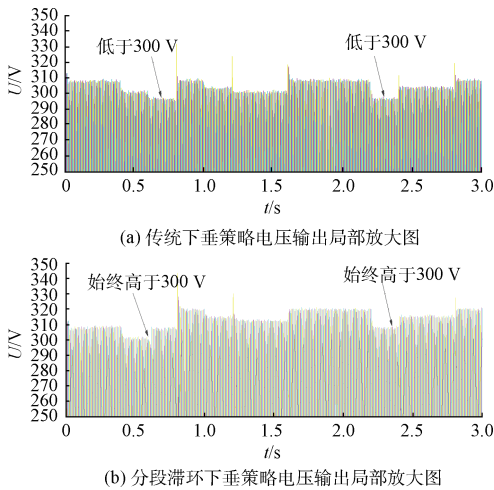


图8 两种下垂控制策略电压输出局部放大图

间段内,由于无功负载增加,系统输出电压会降低,但是两个图输出有明显的差别。图8(a)使用的是传统下垂控制策略,当无功负载明显增加时,系统工作点会沿着下垂特性曲线向下移动,系统的输出电压会低于300V,若无功率继续增加电压输出甚至会低于290V。而图8(b)使用的是分段滞环下垂控制策略,当系统无功率明显增加时,到达滞环功率设定值上限时,系统工作点会从第1条曲线上跳跃到第2条曲线上,可以保证无功功率增大时,系统输出电压保持在311V左右。

通过图8两个图的对比可以得到了使用分段滞环下垂策略时,微网无论是工作在孤岛状态下还是并网状态下都可以保证系统电压的工作在指定的 311 ± 10 V,保证微网运行的可靠性与稳定性,从而证明了本策略的可行性和优越性。

5 结 论

本文提出了微电网分段滞环下垂控制策略,由于采用此控制策略可以很好的解决由于下垂系数过大或者过小造成的不可调和的矛盾,采用分段控制解决了有功功率和无功率在较宽的范围内变化时,输出频率和电压幅值仍保持在设定的范围内的问题,同时由于采用滞环控制可以防止实际功率在分段处附近变化时,输出点在2条曲线间来回移动,从而增加了系统的稳定性。最后通过在MATLAB/Simulink环境中建立下垂控制仿真模型,让2种模型输出结果进行对比,经过对比得到,使用分段滞环下垂策略时可以大大提高了系统的响应速度,且保证有功功率和无功率在较大范围变化时,系统输出频率和电压幅值在较小范围内变化,从而保证微电网频率和电压的稳定性,同时验证了本策略的可行性和优越性。

参考文献

[1] 赵玉全,刘雪飞,贾勤. 分布式电力系统动态模型及

频率调节特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(3):23-25.

- [2] 余岳,粟梅,孙尧. 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6):1261-1267.
- [3] 马添翼,金新民,梁建钢. 孤岛模式微电网变流器的复合式虚拟阻抗控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12):304-312.
- [4] 徐青山,孙鄞,丁茂生. 采用下垂控制的微电网小干扰稳定性分析[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2013(12):56-62.
- [5] 刘静,陶晓峰. 基于下垂特性的分布式发电系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(7):635-640.
- [6] 马添翼,金新民,荆龙. 基于稳定性分析的微电网变流器系统阻抗设计[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(2):123-129.
- [7] 张东,卓放,师洪涛. 基于下垂系数步长自适应的下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24):20-25.
- [8] 郑永伟,陈民铨,李闯,等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7):6-11.
- [9] 王阳,鲁宗相,闵勇,等. 基于降阶模型的多电源微电网小干扰分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1):1-8.
- [10] 郭力,王成山,王守相,等. 两类双模式微型燃气轮机并网技术方案比较[J]. 电力系统自动化, 2009(8):84-88.
- [11] 肖朝霞,王成山,王守相. 含多微型电源的微网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6):81-85.
- [12] 孙云岭,黄伟,王冠男,等. 微源并网逆变器下垂控制策略的改进研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(1):6-10.
- [13] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2):100-107.
- [14] 郭力,王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2):82-86.
- [15] 黄玉水,吴永利,朱久安,等. 一种改进的低压微电网逆变器控制技术的研究[J]. 电源技术, 2014(12):2349-2352.

作者简介

杨海柱,1975年出生,博士,教授,主要研究方向为光伏并网发电系统、电力电子与电气传动、新能源技术等。

E-mail:35948436@qq.com

徐锦举,1989年出生,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与新能源。

E-mail:353841140@qq.com