

## 基于谐振控制的微电网储能变流器多目标控制策略

李彦林<sup>1,2</sup>,王明彦<sup>1</sup>,郑载满<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 黑龙江东方学院,黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:** 为提高储能系统利用率,实现多目标控制,提出一种基于比例矢量比例积分(PVPI)控制的分频协调控制策略。利用PVPI控制所具有的频率选择特性,理论上实现对特定次频率分量的零稳态误差控制,使储能变流器提供功率的同时有选择性地补偿谐波、无功和不平衡电流,从而有效利用了储能系统,改善了微电网电能质量,减小了微电网接入对低压配网电能质量的影响。仿真结果证明了所提多目标分频控制策略的有效性。

**关键词:** 微电网; 变流器; 储能; 电能质量; 电流检测; PVPI控制; 多目标控制

**中图分类号:** TM 46

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.004

## 0 引言

相对于大电网,以分布式发电理论为基础,包含分布式电源、负荷、储能装置的微电网作为一个可控的供电系统,既可运行在并网模式,也可运行在孤岛模式。由于微电网自身的容量相对较小而呈现出弱电网的特点以及在负载非线性、不平衡突变等情况影响下,微电网内的电压、电流谐波、三相电压不平衡、电压波动跌落等电能质量问题相对于大电网更突出,尤其在微电网与配电网公共连接点(PCC)处的电能质量问题,除了会影响微电网的稳定运行,还会对配电网带来影响。此外,可再生能源,如风力发电、光伏发电等微电源由于受天气、环境等因素影响而具有的功率波动性也会影响微电网的电能质量,特别是对PCC处电压、频率的稳定性影响。如何抑制微电网内电能质量问题,在保证微电网有效运行的前提下发挥其优势,是非常值得关注的问题<sup>[1-2]</sup>。

针对微电网的功率波动,一般采用储能装置通过双向变流器(VSC)来平抑功率波动。文献[3-4]采用蓄电池储能进行功率调节来抑制功率波动。储能系统在调节微电网功率时通常有冗余容量,甚至可能在一定时间内闲置。另一方面,结合并网发电同时实现无功、不平衡补偿和有源滤波等功能的复合多功能并网逆变器被提出<sup>[5-6]</sup>。

储能装置若能结合多功能并网逆变器充分利用储能容量,则既可降低系统的投资成本,减小系统体积,又能在实现功率输出的同时具有电能质量补偿功能。为此本文提出基于比例矢量比例积分(PVPI)控制的微电网储能变流器分频协调控制策略,实现功率输出控制和对微电网无功、三相电流不平衡及

谐波等多目标按系统余量进行分频补偿控制。

## 1 微电网组成和变流器结构

图1所示的辐射状微电网组成结构中含有微电源、储能和负荷。其中,微电源包括采用并网逆变器接口的光伏电池DG2、DG3,风力发电模拟器DG4,储能装置DG1挂接在PCC处,微电网带有的负荷为整流负荷、不平衡负荷、单相负荷与普通阻感性负荷; $S_x(x=s,1,2,3,4)$ 为静态开关;线路阻抗 $Z_x(x=s,2,3,4)$ 呈阻性。光伏与风力发电接口变流器均采用PQ控制,微电网与配电网并网运行,由配电网对其提供电压和频率支撑。

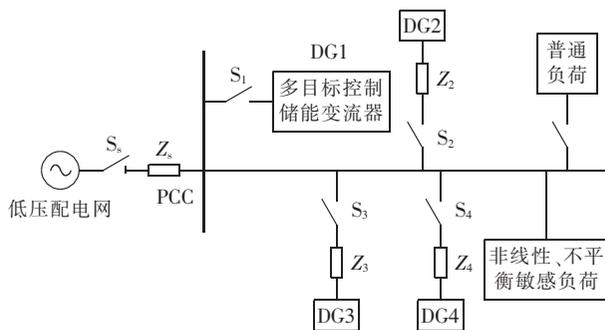


图1 微电网组成结构

Fig.1 Structure of microgrid

基于谐振控制的多功能储能系统既能对微电网提供有功支持,输出或吸收有功功率,还可以对微电网指定次(如5、7、11次)谐波以及一定量的无功和不平衡电流进行补偿。该储能系统主要由磷酸铁锂(LiFePO<sub>4</sub>)电池储能和四桥臂VSC构成,结构如图2所示。图中, $L_b$ 为直流电感; $u_{dk1}$ 为直流电压; $i_d$ 为直流电流; $u_x, i_x(x=a, b, c, n)$ 为电网电压、电流。

LiFePO<sub>4</sub>动态特性模型采用二阶RC模型,如图3所示。图中, $R_0$ 表示欧姆内阻; $R_{p1}$ 和 $R_{p2}$ 表示极化内阻; $C_{p1}$ 和 $C_{p2}$ 表示极化电容<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2013-03-04;修回日期:2014-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077025)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077025)

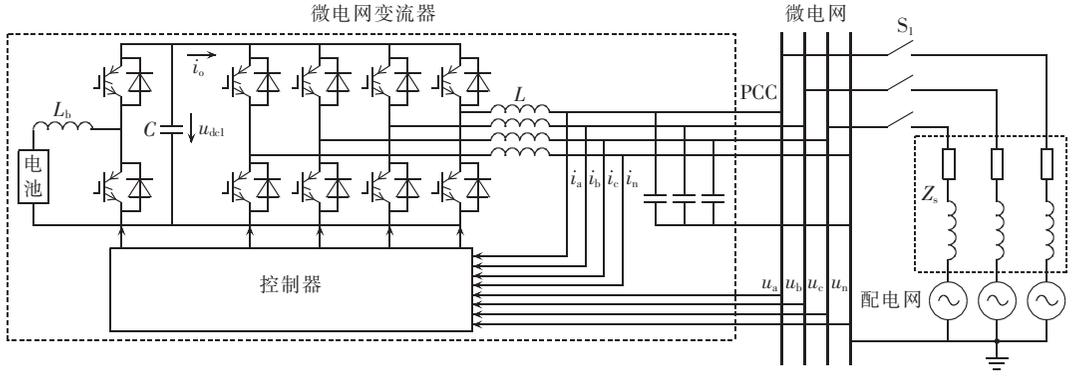


图 2 微电网变流器结构

Fig.2 Structure of microgrid converter

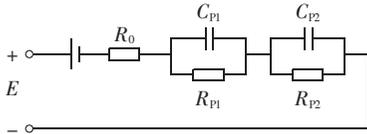


图 3 LiFePO<sub>4</sub> 电池模型

Fig.3 Model of LiFePO<sub>4</sub> battery

## 2 参考电流合成方法

微电网变流器输出由两部分组成:上层控制给出的有功、无功电流指令;补偿无功、不平衡和谐波电流指令。两者合成作为 VSC 控制电流指令。

### 2.1 补偿电流生成方法

如果微电网三相电压不平衡并含有谐波,会影响锁相环(PLL)输出的频率和相位使其产生误差。正常电压情况下代表实际电网电压矢量的相位  $\Phi$  和采用 PLL 检测到的电压矢量相位  $\theta$  应相等,但由于受电压不对称和谐波的干扰使得  $\Phi \neq \theta$ ,致使 PLL 在检测电网电压相位时产生误差<sup>[8]</sup>。

本文采用基于瞬时功率理论的谐波、无功及不平衡电流检测方法抑制电压不平衡畸变干扰,如图 4 中利用  $C_{abc-\alpha\beta}$ (Clarke)变换将三相电网电压  $u_a, u_b, u_c$  变换到  $\alpha\beta$  两相静止坐标系内<sup>[5,9]</sup>,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = C_{abc-\alpha\beta} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [U_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n}) + U_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n})] \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [-U_{1n} \cos(n\omega t + \varphi_{1n}) + U_{2n} \cos(n\omega t + \varphi_{2n})] \end{bmatrix} \quad (1)$$

变换后得到含有各次谐波与正、负序基波分量的  $u_\alpha, u_\beta$ 。为消除干扰,需检测出不含谐波的基波正序电压<sup>[9-10]</sup>,其中  $\omega_0, K, u_\alpha^p, u_\beta^p$  分别为响应频率、阻尼系数和基波电压正序  $\alpha, \beta$  分量。

在  $\alpha\beta$  坐标系到同步旋转  $dq$  坐标系变换过程中,同步旋转角  $\omega t + \theta$  正弦、余弦可直接由电压  $u_\alpha^p, u_\beta^p$

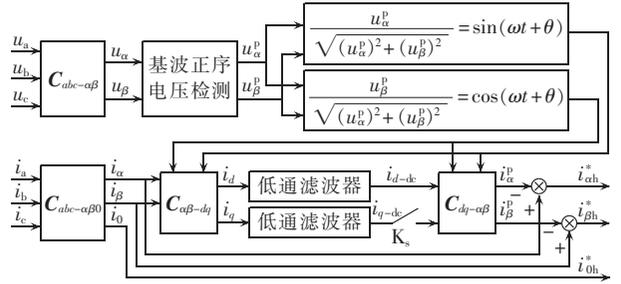


图 4 多目标电流补偿值检测框图

Fig.4 Detection of multi-objective compensation current

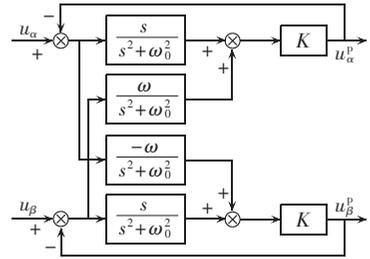


图 5 基波正序电压检测框图

Fig.5 Detection of fundamental positive sequence voltage

表示<sup>[11-12]</sup>:

$$\begin{cases} \sin(\omega t + \theta) = \frac{u_\alpha^p}{\sqrt{(u_\alpha^p)^2 + (u_\beta^p)^2}} \\ \cos(\omega t + \theta) = \frac{u_\beta^p}{\sqrt{(u_\alpha^p)^2 + (u_\beta^p)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

$\omega t + \theta$  与实际电网基波电压矢量中相位时刻保持一致。三相静止坐标系内电流  $i_a, i_b, i_c$  变换到两相静止坐标系内表示为  $i_\alpha, i_\beta, i_0$ , 其中  $i_\alpha, i_\beta$  包含正序基波分量。 $i_\alpha, i_\beta$  利用 Park 变换到  $dq$  同步旋转坐标系中表示为直流形式的有功电流 ( $i_d$ )、无功电流 ( $i_q$ )。电流变换到  $dq$  坐标系内,其所包含的谐波及负序电流分量均以谐波的形式体现在  $i_d, i_q$  内,需要采用低通滤波器(LPF)滤除  $i_d, i_q$  中的谐波,得到不含谐波的直流有功电流  $i_{d-dc}$ 、无功电流  $i_{q-dc}$ ,再对  $i_{d-dc}, i_{q-dc}$  进行 Park 反变换得到  $\alpha\beta$  静止坐标系内的不含谐波的基波有功电流  $i_\alpha^p, i_\beta^p$  ( $K_s$  断开),再从两相静止坐标系内电流  $i_\alpha, i_\beta$  中减去  $i_\alpha^p, i_\beta^p$ ,加上零序分量  $i_0$  构成含

有无功和谐波及不平衡基波负序、零序分量的补偿电流  $i_{\alpha h}^*$ 、 $i_{\beta h}^*$ 、 $i_{0h}^*$ 。

## 2.2 并网参考电流

在  $\alpha\beta$  坐标系内,根据瞬时功率理论复功率  $S$  定义为电压矢量  $e$  与电流共轭矢量  $i^*$  的乘积<sup>[13]</sup>:

$$S = \frac{3}{2} e i^* = \frac{3}{2} (u_{\alpha} + j u_{\beta}) (i_{\alpha} - j i_{\beta}) = p + j q \quad (3)$$

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} (u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}) \\ q = -\frac{3}{2} (u_{\alpha} i_{\beta} - u_{\beta} i_{\alpha}) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $u_{\alpha}$ 、 $u_{\beta}$  和  $i_{\alpha}$ 、 $i_{\beta}$  分别为系统电压、电流在  $\alpha\beta$  坐标系下的分量。由式(4)可知,控制输出功率  $p$ 、 $q$  只需控制  $i_{\alpha}$  和  $i_{\beta}$ 。控制微电网变流器输出有功、无功时,零序电流分量为零 ( $i_0 = 0$ ),将参考值  $p = p^*$ 、 $q = q^*$  代入式(4)中,可得:

$$\begin{cases} i_{\alpha}^* = \frac{2}{3(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} (u_{\alpha} p^* + u_{\beta} q^*) \\ i_{\beta}^* = \frac{2}{3(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} (u_{\beta} p^* - u_{\alpha} q^*) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(4)、(5),如果微电网背景电压不平衡并含有谐波,则  $\alpha\beta$  静止坐标系内电流参考值  $i_{\alpha}^*$ 、 $i_{\beta}^*$  中将引入基波负序分量和各次谐波,使输出电流不平衡并含有谐波,可以采用图 5 所示方法滤除基波电压负序及各次谐波。提取正序电压时,在合理范围内  $K$  值可以取相对较大值,提高响应速度。

## 3 微电网变流器分频控制

储能装置并联在 PCC 处,控制目标为:根据微电网变流器剩余容量补偿有限次电流谐波、基波电流无功和三相不平衡电流,根据指令向微电网提供有功功率从而实现电能质量控制和瞬时功率平衡。

### 3.1 VSC 多目标分频控制

图 6 的储能变流器的多目标控制结构中变流器

输出为有功电流和补偿电流。微电网变流器电流参考值由补偿给定值  $i_{\alpha\beta h}^*$  和功率给定值  $i_{\alpha\beta}^*$  复合而成,包括可能需要补偿的基波负序和零序电流分量、基波无功电流分量、各次谐波分量和并网有功电流分量。

微电网中储能变流器根据指令输出功率,剩余容量对电能质量扰动进行补偿,根据自身容量计算出补偿电流,当补偿量超出实际输出容量时,根据自身容量选择只补偿无功或某指定次频率电流谐波(如 5 次、7 次、11 次谐波等)或某些次电流谐波之和,实现有限补偿输出。

图 6 中为实现有选择性地重点补偿某些量及充分利用变流器剩余容量,采用一种改进的谐振控制对基波和各次谐波实现分频控制,具有分频控制功能的谐振控制器是在文献[14]提出的矢量比例积分(VPI)控制的基础上,使比例控制 P 与 VPI 控制并联构成的 PVPI 控制。

根据文献[14],式(6)表示的 VPI 控制是式(7)的复矢量 PI 控制根据式(8)进行等效变换,从正、负序旋转  $dq$  坐标系到  $\alpha\beta$  两相静止坐标系变换后合成的表达式。

$$G_{VPI}(s) = \frac{K_P s^2 + K_I s}{s^2 + \omega^2} \quad (6)$$

$$G_{CPI}(s) = \frac{s K_P + K_I + j \omega K_P}{s} \quad (7)$$

$$f_{\alpha\beta} = f_{dq} e^{-j\omega t} \quad (8)$$

将 PI 控制器表达式与复矢量 PI 控制器表达式对比,可以看出式(7)中复矢量 PI 控制比例项  $K_P$  与  $j\omega K_P/s$  项之间存在耦合关系,致使难以实现系统的动态响应单独控制,为改善其动态响应能力,在复矢量 PI 控制基础上并联比例控制项  $K_{P0}$ ,并联后表达式如下:

$$G_{PCPI}(s) = K_{P0} + \frac{s K_P + K_I + j \omega K_P}{s} \quad (9)$$

依据式(8),将正序旋转  $dq$  坐标系内的表达式(9)变换到两相静止  $\alpha\beta$  坐标系得到表达式(10);从负序旋转  $dq$  坐标变换到两相静止  $\alpha\beta$  坐标系可得表达式(11)。

$$G_{PCPI}^+(s) = G_{PCPI}(s + j\omega) = K_{P0} + \frac{K_P s + K_I}{s - j\omega} \quad (10)$$

$$G_{PCPI}^-(s) = G_{PCPI}(s - j\omega) = K_{P0} + \frac{K_P s + K_I}{s + j\omega} \quad (11)$$

其中,上标 +、- 分别代表正、负序。

由式(10)、(11)相加可得到在两相静止  $\alpha\beta$  坐标系内表达式为:

$$G_{PVPI}(s) = G_{PCPI}^+(s) + G_{PCPI}^-(s) = 2K_{P0} + 2 \frac{K_P s^2 + K_I s}{s^2 + \omega^2} \quad (12)$$

式(12)本质上是比例谐振控制的一种,称为 PVPI 控制,PVPI 控制中通过改变比例项  $2K_{P0}$  使动

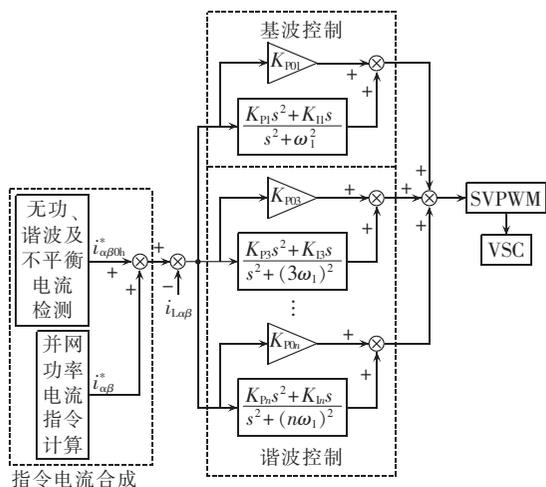


图 6 多目标补偿电流控制框图

Fig.6 Block diagram of multi-objective compensation current control

态性能可以独立调节,改善了 PVPI 控制的微电网变流器性能。

为比较 VPI 和 PVPI 2 种控制器性能,假设 VPI 控制参数  $K_{P0}=0$ 、PVPI 控制参数  $K_{P0}=10$ ,其他参数相同统一设定为  $K_p=20, K_i=1000, \omega=314 \text{ rad/s}$ 。图 7 为 2 种控制器波特图对比,根据图 7 并结合式(6)、(12)分析,理论上 2 种控制器均可以使并网电流误差为 0,原因是 2 种控制器均使虚轴上增加了极点,该极点频率为  $\omega$ ,使频率为  $\omega$  的输入在此处产生谐振,利用谐振特性使频率  $\omega$  处的增益值理论上达到无穷大(如图 7 中当  $\omega=314 \text{ rad/s}$  时),从而系统在谐振频率为  $\omega$  的 VPI 或 PVPI 控制器控制下使系统输出无静差地跟踪同频率正弦指令输入。由于在谐振频率点之外增益很小,能使非谐振频率点的信号得到有效抑制,即具有频率选择性能,实现仅对某一频率信号控制,因此若要补偿某几次谐波,只需将每次谐波频率对应的 PVPI 控制并联即可[15-16]。

相对 VPI 控制, PVPI 控制在 VPI 控制谐振点频率选择特性基础上,通过加入比例项(P)使系统开环零点发生变化以加快响应,改变控制器的比例项(P)则使系统的动态性能相应同步变化。从另一角度看,通过图 7 可见加入比例项使系统改变了频率特性引起转折频率增大,因此提高了动态响应能力。

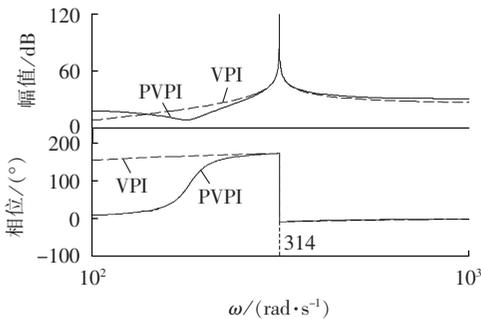


图 7 VPI 和 PVPI 控制器的波特图对比

Fig.7 Comparison of Bode diagrams between VPI and PVPI controls

### 3.2 直流 DC/DC 变换器控制

LiFePO<sub>4</sub> 电池储能系统通过双向 DC/DC 变换器与直流母线相连,在储能充/放电过程中在降压/升压模式之间变换。

为使直流电压稳定, LiFePO<sub>4</sub> 电池储能系统采用双环控制策略,外环采用 PI 控制器控制直流电压  $u_{dc1}$ ,为提高电流环响应速度,内环采用比例控制器(P)对电感电流  $i_{sc1}$  进行快速控制,使电流  $i_o$  前馈抑制其对直流母线电压  $u_{dc1}$  的影响。如图 8 所示的 DC/DC 控制框图,电压外环作用是稳定直流电压  $u_{dc1}$ ,抑制功率波动;电感电流内环还可确保电流不超过允许值。

另外应防止 LiFePO<sub>4</sub> 电池内电量的过充过放:

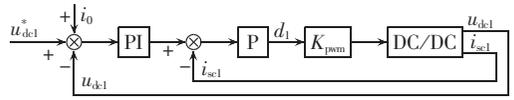


图 8 DC/DC 控制框图

Fig.8 Block diagram of DC/DC control

在电池充电量达到上限值后限制充电,使电池仅对外放电;当电池放电量达到下限值后限制电池放电,仅对电池进行充电。

需要指出的是, LiFePO<sub>4</sub> 电池储能系统由于其自身特点只适合平抑低频功率波动,所以其功率指令需限制在相对低频段。

## 4 仿真与分析

利用 MATLAB/Simulink 建立图 1 所示微电网仿真模型,对提出的储能变流器控制策略进行仿真验证。微电网各参数为:微电网并网运行,低压配电网电压  $U_m$  为 380 V/220 V,储能直流侧电压  $u_{dc1}=800 \text{ V}$ ;微电源 DG1 为 LiFePO<sub>4</sub> 电池储能系统,额定功率  $P_{dg1}=20 \text{ kW}$ ;DG2 额定功率  $P_{dg2}=6 \text{ kW}$ ;DG3 额定功率  $P_{dg3}=6 \text{ kW}$ ;DG4 模拟风电输出波动功率,额定功率  $P_{dg4}=15 \text{ kW}$ ;非线性负荷为三相整流电路整流后带  $L_{11}=3 \text{ mH}$  电感、 $R_{11}=100 \Omega$  电阻;三相平衡阻感负载有功功率  $P_L=150 \text{ kW}$ ,无功功率  $Q_L=50 \text{ kvar}$ ;三相不平衡电阻负荷  $R_{21}=40 \Omega, R_{22}=80 \Omega, R_{23}=100 \Omega$ ;单相负荷采用非线性二极管整流给电阻  $R_{31}=10 \Omega$  的负载供电;线路阻抗  $Z_{line}=0.642+j0.101 \text{ p.u.}$ 。

### 4.1 谐波及无功补偿

由于微电网中带阻感三相不可控整流负载,微电网电流发生畸变, THD=5.98%,其中 5、7、11 次谐波含量相对较高,其余各次谐波含量较低。

图 9(a)是 LiFePO<sub>4</sub> 电池储能系统根据上层调度指令,仅输出 10 A 电流、不参与电能质量补偿时 PCC 处电流,方向为由微电网到配电网;图 9(b)是 LiFePO<sub>4</sub> 电池储能系统参与补偿 5 次谐波后的电流;图 9(c)是补偿 5、7 次谐波后的电流。补偿 5 次谐波后 THD=4.67%,补偿 5、7 次谐波后 THD=3.58%,可看出微电网 PCC 处电流波形得到明显改善,达到并网要求。

图 10 是微电网内交流公共母线带有功率  $P=150 \text{ kW}$ 、无功功率  $Q=50 \text{ kvar}$  负载时的波形,0.2 s 之前 LiFePO<sub>4</sub> 电池储能系统不参与补偿,0.2 s 后启动多功能补偿。可见,补偿前 PCC 处电压、电流有很大相位差,补偿后电压与电流的相位相同,功率因数近似等于 1,有效实现了无功功率补偿。

### 4.2 负载不平衡

微电网带有三相不平衡负载,图 11(a)为未补偿时 PCC 处电流,图 11(b)为投入带补偿功能的 DG1 后 PCC 处电流波形。可见采用多目标控制补偿有效地减弱了不平衡负荷对 PCC 处电流的影响,使微电网

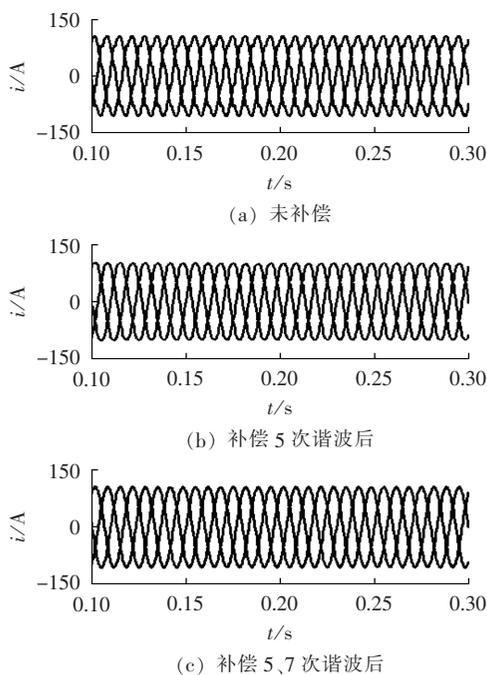


图 9 补偿谐波后 PCC 处电流波形

Fig.9 Waveforms of PCC current with harmonic compensation

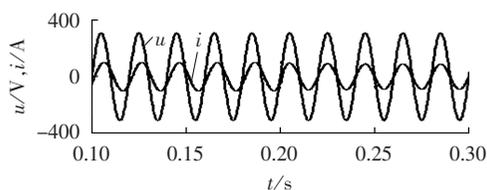


图 10 无功补偿前后波形

Fig.10 Waveforms before and after reactive compensation

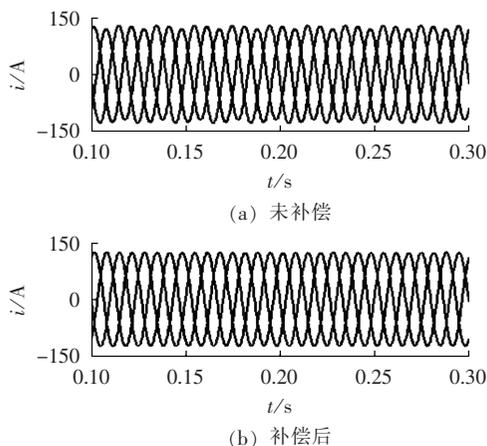


图 11 三相不平衡负荷时 PCC 处电流波形

Fig.11 Waveforms of PCC current with unbalanced three-phase load

输出到配电网的电流不平衡被消除。

图 12 为带单相整流负载时,  $\text{LiFePO}_4$  电池储能系统进行补偿前后 PCC 处电流波形, 可见未补偿时 PCC 处电流含谐波且不平衡, 存在负序和零序电流, 在 0.23 s  $\text{LiFePO}_4$  电池储能系统投入运行后 PCC 处

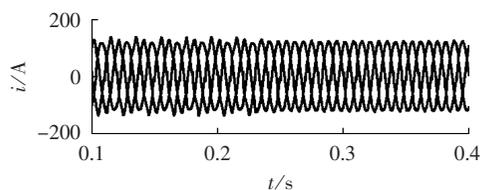


图 12 带单相整流负载时 PCC 处电流波形

Fig.12 Waveforms of PCC current with single-phase rectifier load

电流实现平衡, 谐波降低。

由以上结果分析可以看出, 采用  $\text{LiFePO}_4$  电池储能系统多目标补偿控制使微电网输出到配电网的电流符合电能质量要求。

#### 4.3 输出电流功率

图 13 是  $\text{LiFePO}_4$  电池储能系统输出有功功率跟踪上层调度功率指令值的跟踪过程, 可见  $\text{LiFePO}_4$  电池储能系统能根据上层调度指令输出相应的并网电流, 对微电网提供短时功率支持。

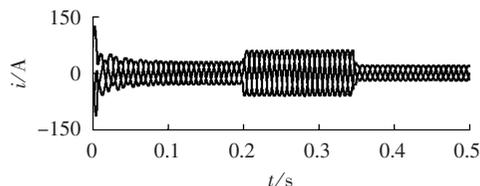


图 13 储能系统并网输出电流波形

Fig.13 Waveforms of output current of grid-connected energy storage system

## 5 结论

为充分利用储能系统, 使其既可以提供有功功率, 又可以利用剩余容量补偿微电网电能质量扰动, 本文提出基于 PVPI 控制的储能多目标分频控制策略。理论分析和仿真结果表明所提出的控制策略能输出指定功率和对微电网无功、三相电流不平衡及谐波进行补偿, 使储能系统实现了功能复用。

#### 参考文献:

- [1] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 多功能并网逆变器研究综述[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 5-15.  
ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang. Overview of multifunctional grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 5-15.
- [2] 唐西胜, 邓卫, 李宁宁, 等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 99-108.  
TANG Xisheng, DENG Wei, LI Ningning, et al. Control technologies of microgrid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 99-108.
- [3] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 76-82.  
SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 76-82.

- [4] 张坤,毛承雄,陆继明,等. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J]. 电工技术学报,2011,26(7):7-14.  
ZHANG Kun,MAO Chengxiong,LU Jiming,et al. Power control strategy of directly driven wind turbine with energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(7):7-14.
- [5] 李彦林,王明彦,郑载满. 微网运行条件下储能并网 VSC 多目标控制策略[J]. 电网技术,2013,37(7):1792-1798.  
LI Yanlin,WANG Mingyan,ZHENG Zaiman. A multi-objective control strategy for grid-connecting VSC under grid-connected operation of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(7):1792-1798.
- [6] 曾正,杨欢,赵荣祥,等. 一种多功能并网逆变器拓扑及其控制[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):55-61.  
ZENG Zheng,YANG Huan,ZHAO Rongxiang,et al. Topology and control of multi-functional grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):55-61.
- [7] 谢俊文,陆继明,毛承雄. 数字式通用型电池模拟器的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):156-162.  
XIE Junwen,LU Jiming,MAO Chengxiong. Design and implementation of digital battery simulator[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,33(5):156-162.
- [8] 徐海亮,章伟,胡家兵,等. 电网电压不平衡及谐波畸变时基波电压同步信号的检测[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):28-34.  
XU Hailiang,ZHANG Wei,HU Jiabing,et al. Synchronizing signal detection of fundamental voltage under unbalanced and/or distorted grid voltage conditions[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(5):28-34.
- [9] 杨胜跃,吴敏. 一种考虑频率偏差的谐波电流检测方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(7):57-61.  
YANG Shengyue,WU Min. A harmonic current detection method considering frequency shift[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(7):57-61.
- [10] YUAN X,MERK W,STEMMLER H,et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2002,38(2):523-532.
- [11] 陈东华,谢少军,周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):62-67.  
CHEN Donghua,XIE Shaojun,ZHOU Bo. An improved synchronous reference frame method for harmonics and reactive currents detection of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(20):62-67.
- [12] 孙驰,魏光辉,毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):43-48.  
SUN Chi,WEI Guanghui,BI Zengjun. Detection for reactive and harmonic currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(12):43-48.
- [13] AKAGI H,WATANABE E H,AREDES M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning[M]. New York, USA:John Wiley and Sons Inc,2007.
- [14] LASCU C,ASIMINOAEI L,BOLDEA I,et al. High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(5):1826-1835.
- [15] 李彦林,王明彦,郑载满. 具有电压补偿功能的微网逆变器控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(16):41-47.  
LI Yanlin,WANG Mingyan,ZHENG Zaiman. Microgrid inverter control with voltage compensation function[J]. Power System Protection and Control,2013,41(16):41-47.
- [16] 杨勇,赵春江. 分布式发电系统中并网逆变器比例谐振控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):51-55.  
YANG Yong,ZHAO Chunjiang. Proportional resonance controller of grid-connected inverter for distributed generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):51-55.

## 作者简介:



李彦林

李彦林(1974-),男,黑龙江哈尔滨人,讲师,博士研究生,研究方向为分布式发电、微电网控制(**E-mail**:arm1@163.com);

王明彦(1957-),男,黑龙江绥化人,教授,博士研究生导师,研究方向为中高压大功率交流驱动、电能变换技术(**E-mail**:mingyan@hit.edu.cn);

郑载满(1941-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,研究方向为有源滤波控制、电力传动控制技术(**E-mail**:zaiman@hit.edu.cn)。

## Multi-objective control based on resonant control for microgrid energy storage converter

LI Yanlin<sup>1,2</sup>,WANG Mingyan<sup>1</sup>,ZHENG Zaiman<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China;

2. East University of Heilongjiang,Harbin 150086,China)

**Abstract:** A strategy of frequency-dividing control based on PVPI(Proportional Vector PI) control is proposed to enhance the utilization rate of energy storage system and achieve its multi-objective control. The frequency selection characteristics of PVPI control are used to theoretically realize the zero steady-state error control of a special frequency component,by which,the energy storage system supplies power while compensates selectively the harmonic,unbalance and reactive currents,resulting in the improvement of microgrid power quality and the suppression of its impact on low-voltage distribution grid. Simulative results verify the validity of the proposed control strategy.

**Key words:** microgrid; electric converters; energy storage; power quality; current detection; PVPI control; multi-objective control