

基于动态等效阻抗匹配的 光伏发电最大功率点跟踪控制

郑颖楠, 王俊平, 张霞

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学), 河北省 秦皇岛市 066004)

Maximum Power Point Tracking Control in the Photovoltaic Power Generation Based on Dynamic Equivalent Impedance Matching Theory

ZHENG Yingnan, WANG Junping, ZHANG Xia

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province (Yanshan University), Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

ABSTRACT: A new method which can linearize the nonlinear internal impedance was proposed. Based on the concept of dynamic equivalent impedance error, the engineering significance of dynamic equivalent impedance matching and the validity of dynamic equivalent impedance error control method were discussed. According to the thought of equivalent impedance matching, the self-optimizing maximum power point tracking (MPPT) control structure and algorithm in the photovoltaic power generation were developed, which can be achieved by digital. The experimental results show that the dynamic equivalent impedance matching algorithm has more obvious advantages, compared with the classic MPPT control algorithms.

KEY WORDS: equivalent impedance; impedance matching; maximum power point tracking (MPPT); photovoltaic power generation

摘要: 提出1种非线性内阻抗的线性化处理办法。基于动态等效阻抗误差的概念, 论述动态等效阻抗适配的工程意义; 阐述动态等效阻抗误差控制的有效性。根据等效阻抗适配思想, 构造出数字实现的光伏发电最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)自寻优控制系统结构和算法。最后的实验结果证明, 与几种经典 MPPT 控制算法相比, 动态等效阻抗匹配控制算法具有更明显的优点。

关键词: 等效阻抗; 阻抗匹配; 最大功率点跟踪; 光伏发电

0 引言

为了应对能源危机和化解日趋严重的环境问

题, 风能、太阳能等新型能源的研究开发受到人们普遍重视。尤其是光伏发电涉及的技术问题, 很早就受到人们重视、研讨并不断提出解决方案^[1-2]。

考察已提出的光伏发电系统最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)方案, 虽然各具特色, 但在动态跟踪的快速性、稳态跟踪精度方面, 以及系统长期工作时寻优跟踪能力的鲁棒性方面仍显不足。由于光伏电池本身具有典型的非线性, 加上系统老化, 参数变异等因素, 导致常规 MPPT 方法的跟踪效果受到影响。常用的扰动观测法(perturb-observe, P&O)和增量电导法(increment conductance, INC)等自寻优策略也存在跟踪的快速性和稳态跟踪精度的矛盾。为了克服这些问题, 出现了许多智能控制方法^[3], 但大都显得比较复杂而不便于应用。开发具有更优良动、静态特性的 MPPT 方法成为人们不懈的追求。本文尝试从阻抗匹配的视角, 提出1种动态自寻优 MPPT 控制方法。

为便于阐明问题本质, 首先考察非线性阻抗网络。与线性网络比, 非线性网络更复杂, 尚有很多理论和实践问题没有解决。本文仅针对相对简单的非线性阻抗网络——单调型连续非线性电阻网络^[4]展开研究。这种非线性电阻的伏安特性曲线是单调增长或下降的, 它同时是电流控制又是电压控制的, PN 结类的二极管器件就具有这种电阻性质。本文基于非线性阻抗的动态阻抗定义, 分析了非线性内阻抗的外在特性, 明确了非线性动态内阻抗与动态阻抗定义之间的关系, 从实用化角度给出了动

基金项目: 国家自然科学基金项目(50837003)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50837003).

态等效内阻抗的补充定义。然后结合引入的动态等效阻抗匹配误差概念,提出1种非线性阻抗网络的匹配处理方法,形成1种新的光伏发电动态MPPT控制策略。最后在光伏发电实验平台上验证了动态等效阻抗匹配方法的优越性。

1 等效阻抗的概念

任何电网络都可以认为是由“源”和“载”构成。“源”与“载”之间通过传递或者交换能量完成既定的工作目标。为了完成预期任务,需要适当的控制策略。而着眼于不同的指标与方法,就会形成各种不同的控制策略。实际上许多其他非电网络也具有类似的特点,因此基于这种观点的研究结论具有相对广适性。

对于图1所示含源电阻网络,在满足“源”的内阻抗 r 等于“载”的等效阻抗,即阻抗匹配时,此电网络可以实现由A到B的最大功率传输。这一结论在众多实践中获得广泛应用。对于交流系统也有相类似结论^[5],在此不再复述。然而容易验证,对于非线性内阻抗网络,上述结论不能成立。

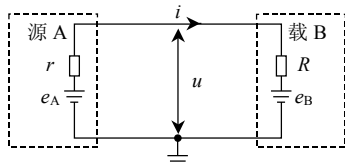


图1 相连电网络

Fig. 1 Electric network connected

例如,对于图1所示电路,若 $e_A=3\text{V}$, $e_B=1\text{V}$,如果内阻 r 是定常的,且 $r=3\Omega$,则当 $R=1\Omega$ 时, r 等于“载”的等效阻抗 3Ω ,电路处于匹配状态。然而,如果其他条件不变,若内阻抗具有单调型非线性特性^[4]:例如 $r(i)=i$,则容易验证最大功率传输条件变为: $r=1\Omega$ 。而处于最大功率传输状态下的等效外阻抗为 2Ω 。

上例中的内阻抗形式 $r(i)=i$ 仅为单调型连续非线性阻抗的1个例子,而非限定的前提形式。只要 $r(i)$ 满足单调型连续性,则不影响下面的讨论和结论。

这个算例显示了线性内阻抗网络与非线性内阻抗网络的区别。即,若“源”的内阻抗呈现非线性 $r(i)$ ，“源”的真实内阻抗等于“载”的等效输入阻抗时,网络并不能保证实现最大功率传输,网络效率也并不最高。尤其当A、B是2个变换器时,由于调制的原因,“源”与“载”变换器的阻抗均会呈现非线性变化,其所产生的不匹配因素将导致出

现诸如用于互连A、B 2变换器的母线电压 u 发生泵升或者跌落等不稳定现象。为探求此类非线性带来的问题,首先分析非线性阻抗对电路的影响。

按照文献[4]给出的定义,单调型连续非线性电阻可以用下式表示

$$u_R=f(i) \quad (1)$$

式中: u_R 为非线性电阻两端的电压; i 为流过非线性电阻的电流。非线性电阻在某一工作点的动态电阻定义为

$$\tilde{r}=\frac{du_R}{di} \quad (2)$$

为了方便研究互连网络的动态协调问题,进一步考察单调型连续非线性内阻抗对输出端电压的影响。

设单调型连续非线性内阻抗可以表示为 $r=r(i)$,容易验证它可以写成符合式(1)的形式: $u_R=f(i)=ir(i)$ 。若将其在工作点 $i=i_0$ 附近展开,有:

$$r(i_0+\Delta i)=r(i_0)+\left.\frac{dr}{di}\right|_{i=i_0}\Delta i+\frac{1}{2}\left.\frac{d^2r}{di^2}\right|_{i=i_0}\Delta i^2+\dots \quad (3)$$

当设含源一端口网络的端口电压为 u ,电源电势为 e 时,则端口电压可以表示为 $u=e-u_R$,由此可得:

$$\left.\frac{du}{di}\right|_{i=i_0}=\lim_{\Delta i\rightarrow 0}\frac{\Delta u}{\Delta i}\Big|_{i=i_0}=-r(i_0)-i_0\left.\frac{dr(i)}{di}\right|_{i=i_0} \quad (4)$$

容易验证:

$$\frac{du_R}{di}=-\frac{du}{di} \quad (5)$$

式(5)说明,具有单调型连续非线性内阻抗的含源电路,其动态等效内阻抗 \tilde{r} 可以通过该网络端口电压对电流的导数获得,其数值为该导数的负数。即

$$\tilde{r}=-\frac{du}{di} \quad (6)$$

动态等效内阻抗也称非线性“源”网络的等效输出阻抗。实践中,根据补充定义式(6),动态等效内阻抗可以利用端口电压对时间的微分,和端口电流对时间微分获得,也可以通过差分,以数字化的形式获得,即

$$\frac{du}{di}=\left(\frac{du}{dt}\right)/\left(\frac{di}{dt}\right)\approx\frac{\Delta u}{\Delta i} \quad (7)$$

由于动态等效内阻抗是非线性内阻抗在工作点附近的线性化描述。当无法确切知道非线性内阻抗的变化规律时,却可以依据补充定义,通过该非线性网络端口电压 u 和电流 i 的表现,取得其在工作点附近的等价值,从而判定网络的匹配状态。因此,

式(6)还提供了动态等效内阻抗的测量方法。

容易验证,当网络内阻抗为线性定时,式(6)的定义依然成立。因为此时

$$\left. \frac{dr(i)}{di} \right|_{\substack{i=i_0 \\ r=\text{const}}} = 0 \quad (8)$$

使用式(6)求得的,刚好就是线性不变内阻抗 $r(i_0)=r$,这说明补充定义同样适用于线性阻抗概念,是线性内阻抗概念向非线性内阻抗系统的延拓。

有了反映动态等效内阻抗概念的式(6),就可以用它来实时测量网络的动态内阻抗,也就可以方便地用它来分析网络的性质。

2 动态等效阻抗匹配误差

基于动态等效内阻抗概念,结合经典等效外阻抗定义^[4]($\tilde{R}=u/i$),再把控制理论中误差的概念引到一端口互连网络中,来引申定义网络的动态等效阻抗匹配误差为

$$e_z = \tilde{R} - \tilde{r} \quad (9)$$

误差 $e_z \neq 0$ 时,称网络系统处于等效阻抗失配状态。失配程度可以由阻抗匹配误差判断。当 $e_z > 0$ 时,说明输入阻抗大于输出阻抗,当 $e_z < 0$ 时,说明输入阻抗小于输出阻抗。可以通过调整外等效阻抗 \tilde{R} 的办法降低阻抗误差,使之匹配,反之亦然。

上述定义其实只是对阻抗的匹配状态做了偏差化描述,并当作系统的误差来使用。引入阻抗匹配误差概念的目的,是对互连网络进行动态控制或评价。而控制的目标,可以是消除等效阻抗误差,也可以是根据需要,把等效阻抗误差控制在期望的水平上。可见,利用阻抗误差的概念,就可以根据网络阻抗函数特性,通过在线调整的方式调节网络的状态,实现协调控制的目的。

3 动态等效阻抗和阻抗误差的工程意义

动态等效阻抗并不是真正的阻抗,而是1种电路等价意义上的虚拟阻抗,但是它却具有重要的实践价值。这体现在它可以用来处理非线性网络的协调控制问题上。光伏发电MPPT是1个典型的协调控制问题,其协调性质体现在跟随不断变化的工况寻找新的最佳工作点。

其实,协调问题不仅限于MPPT。例如,在分布式多(发电)机微电网中,含有小功率发电机,逆变器、变换器等电力电子装置。在这个多机微电网中,各个变换器工作状态的变化和各个负载的变化,都会影响微电网节点电压和网络中的潮流。其

中任何一个变换器的负荷状态,都受其他负载和变换器变化的影响^[6-7]。为了正常工作,网络中的各个发电单元必须彼此协调,共同对所有负载供电,并保证负载节点电压满足要求。这就需要适当调节变换器工作状态。但是如果在不知道变换器的负荷是否与自身功率能力相匹配,是否已经到达维持系统稳定的边缘的状态下盲目调整,就有可能造成网络不稳定。为避免这种情况,可以通过测量变换器的等效负载阻抗,测量自身的动态等效内阻抗,来判断和调节。微电网是一种典型的,需要协调控制的,多节点非线性网络。基于等效阻抗匹配误差的概念,协调控制问题可以转化为一端口网络的等效阻抗调节问题。

有了阻抗误差的概念,当对一端口复杂网络进行调节时,就可以掌握变换器和与之相连复杂网络之间的相对状态,不仅可以根据阻抗特性实施恰当的控制律、决定控制量的大小,而且能够实时掌握互连网络的稳定余量^[8]。而后者对于实现网络的智能化管理、安全和保护具有重要意义。

建立等效阻抗误差概念之后,就可以对等效阻抗做在线调整,从而为A、B子系统之间的能量传递在工程上找到一种新的控制方式。能够根据网络自身的阻抗特性确定校正方案,获得期望的动、静态性能。当期望系统处于某种状态时,甚至可以控制等效内阻抗与等效外阻抗的比例关系(适配而不是匹配),从而达到希望的控制目标。而当希望网络处于最大功率传输状态时,则可调整到匹配状态。因此,由阻抗匹配到阻抗适配,概念的转变,提供了一种新的控制思路,能够从新的角度去理解和解决工程问题。

4 基于等效阻抗匹配的光伏发电MPPT控制方式

极值控制问题不仅存在于光伏发电系统和风力发电系统^[8-9],其他应用领域都有类似问题。诸如:最小能量消耗控制、最低成本控制、时间最优控制等,都属同类。是一类函数的极大值控制问题。在光伏和风力发电系统中,目标是寻找跟踪最大功率点,简记为MPPT。

光伏电池机制模型为

$$i = n_p I_{ph} - n_p I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{KAT} \left(\frac{u}{n_s} + iR_s \right) \right] - 1 \right\} - \frac{u + iR_s}{R_{sh}} \quad (10)$$

式中: i 为输出电流; u 为输出电压; I_{ph} 为光生电流; K 为波尔兹曼常数; T 为电池表面温度; A 为

二极管因子; R_s 为串联内电阻; R_{sh} 为并联内电阻; I_0 为反向饱和电流; n_p 为光伏电池并联组数; n_s 为光伏电池串联组数。

为了给出清晰的显式表达, 忽略微弱影响因子 u/R_{sh} , 可以得到近似描述:

$$i = n_p I_{ph} - n_p I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{KAT} \left(\frac{u}{n_s} + i R_s \right) \right] - 1 \right\} - \frac{R_s}{R_{sh}} i \quad (11)$$

由式(11)可以得到另外一种表达式:

$$u = \frac{KAT}{q} \ln \left[\frac{n_p (I_{ph} + I_0) - (1 + R_s / R_{sh}) i}{n_p I_0} \right] - n_s R_s i \quad (12)$$

式(12)符合前提条件: 为单调型连续非线性对象 $y=f(x)$ 。其输出特性如图 2(a)所示。此类对象存在图 2(b)的单一最大功率点, 特点是随着光强和温度变化的一族曲线, 最大功率点是随机变化的。图 2 只绘出 1 条特性曲线做例。显见, 对这样的特性, 需要使用在线跟踪控制^[10-11], 良好的跟踪控制策略可以有效地提高光伏发电系统的工作效率, 降低发电成本。

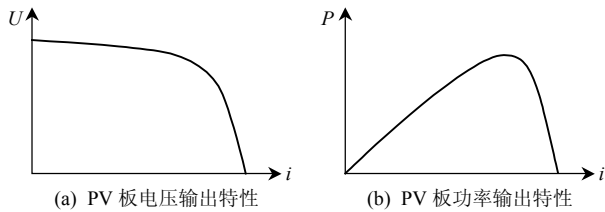


图 2 光伏电池(PV)输出特性

Fig. 2 Output characteristics of photovoltaic cells

需要指出, 式(12)这种近似描述并不会改变光伏电池 $i-U$ 输出特性的单调凸函数性质。而在前面的分析中已经知道, 只要具有单调连续凸函数性质, 就可以应用等效阻抗匹配方法。

另外, 第 1 节中关于单调型连续非线性电阻网络的分析中并没有涉及串联内电阻 R_s 。光伏电池中的串联电阻 R_s 主要由体电阻, 电极电阻和接触电阻等组成。 R_s 受温度和光照影响, 它的存在降低了光伏电池的输出效率^[12], 因此一直是太阳电池理论研究和生产商关注的重点。考察 $R_s \neq 0$ 时的工况, 当存在 R_s 时, 输出端电压可以由(12)式给出。而由补充定义式(6)可以求得:

$$-\frac{du}{di} = \tilde{r} = \frac{KAT}{q} \frac{n_p I_0 (1 + R_s / R_{sh})}{n_p (I_{ph} + I_0) - (1 + R_s / R_{sh}) i} + n_s R_s \quad (13)$$

这说明使用补充定义式(6)可以检测出包括串联阻抗 $n_s R_s$ 和非线性等效阻抗的总等效内阻抗。根据文献[13]对单调凸函数的单极值特性和极值点特征的分析, 可以知道等效阻抗匹配方法依然有效。

使用动态等效阻抗误差的概念可以构成光伏发电自动寻优(极值)调节系统, 如图 3 所示。其中, 信号处理单元实现式(6)的动态等效内阻抗测量以及式(9)的阻抗误差运算, 并由采用的控制律 $D(s)$, 给出适当的控制信号用于调节功率变换器。这里需要指出的是, 如果用数字方式实现, 等效内阻抗的测量需要采用差分计算, 而外阻抗测量直接使用瞬时采样值, 二者之间相差 1 个采样周期。由于采样频率远远高于系统的响应频带, 不会对控制效果产生影响。如果采样周期和控制周期一致, 则控制输出延迟一个周期。当采样周期小于控制周期则不存在这样的问题, 内阻抗和外阻抗计算时刻的差异性引起的误差可以忽略。

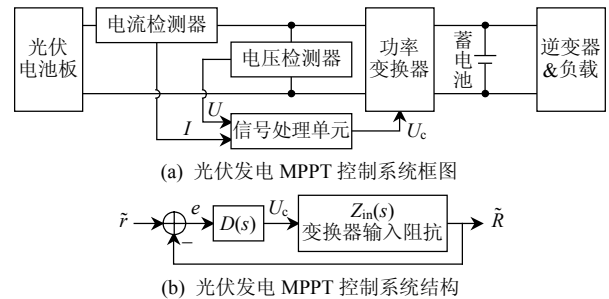


图 3 基于等效阻抗匹配方法的光伏发电 MPPT 控制系统
Fig. 3 MPPT control system of photovoltaic applications based on the equivalent impedance matching method

光伏电池本身的输出特性可以认为是某种变换器的输出特性。因此, 图 3 的光伏发电系统可以看成光伏电池、DC/DC 变换器和逆变器 3 个变换器级联的能量变换系统。这里的区别在于光伏电池与功率变换器之间的相互影响, 因光伏电池非线性特性而变得更复杂, 而 DC/DC 变换器与逆变器之间因为有蓄电池的存在, 使得相互之间的耦合关系有所弱化。如果没有蓄电池, 或者蓄电池的容量有限, 则它们也将成为需要很好协调控制的对象。因此, 上述基于阻抗匹配控制方法的 MPPT 控制问题具有代表性。

5 等效阻抗匹配方法的特点

5.1 等效阻抗匹配方法的基本特征

动态等效阻抗匹配方法的主要特征是根据阻抗匹配误差的正、负和大小: $e_z = \tilde{R} - \tilde{r}$, 基于阻抗传递函数的动态校正方法实现控制。如果是数字方式实现, 它的控制决策可以表示为

$$\begin{cases} \Delta u_k = D(z_k)(\tilde{R}_k - \tilde{r}_k) \\ u_k = u_{k-1} + \Delta u_k \end{cases} \quad (14)$$

式中 $D(z_k)$ 为数字控制器。如果是模拟方式实现, 则

它的控制决策可以表示为

$$u(s) = D(s)e(s) \quad (15)$$

式中 $D(s)$ 为模拟控制律。

动态等效阻抗匹配方法可以依据网络或者变换器的动态阻抗特性，使用经典控制理论分析和设计系统。因此更容易实现动态校正并获得希望的动态性能。

基于等效阻抗和等效阻抗偏差的概念，可以利用阻抗偏差理解和处理系统的匹配或协调控制问题。为了区别，在这里将本方案称为动态等效阻抗匹配方法(dynamic equivalent impedance adaptation method, EIM)。

5.2 基于等效阻抗适配方法的系统控制特点

采用等效阻抗匹配方法，将比采用电导增量法有更显著的优势：使用电导增量法时只能根据判别式的符号判断调节量的增加与下降方向，但是不能轻易确定调节强度的大小，从而影响了调整速度和控制质量。引进阻抗误差的概念后，调整量大小的确定不再难以“举棋不定”了。它可以根据采用的不同控制律确定，因此，当外界条件发生突变时也不会产生误判而造成错误调节了。

为了克服传统方法的不足，增量电导法派生出很多变步长调节方法，在提高控制质量的同时却使控制算法更复杂。引进阻抗偏差概念后，这些问题迎刃而解，控制系统设计也可以使用经典的控制理论。有助于系统设计的理论化和规范化。

以上分析可见，引进等效阻抗偏差概念的等效阻抗匹配控制，继承了电导增量方法的所有优点，并且能够克服原方法的不足。

实践中，等效阻抗匹配方法必须考虑信噪比问题。其实质在于，实现等效内阻抗的微分或者差分检测运算时，将存在因为微分引进的干扰问题。不妥善解决这个问题，等效阻抗匹配方法就不能实际应用。文献[11]指出，存在的干扰问题会给应用造成障碍。由于提高信噪比并非易事，于是很多时候人们转而讨论其他替代解决方案^[14-17]。

引进阻抗误差调节概念的效果，是能够使 2 系统的关联协调控制问题，转化成为单一系统的跟踪控制问题。分析式(9)不难发现，实现等效阻抗匹配控制实际上是用电压与电流反馈共同完成的，如图 3(a)所示。事实说明：这种与能量流控制或等价于能流控制的级联系统协调控制问题可以基于等效阻抗匹配控制思想，由双变量复合反馈闭环控制方

式实现。

采用等效阻抗误差控制的优点有很多，在这里就不再分析列举。注意到等效阻抗匹配控制是一种相对性控制策略。例如在 A、B 两变换器组成的具有直流母线的级联系统中，直流母线电压的调节虽然也属于协调控制，若仅使用等效阻抗匹配方法则控制结果将使母线电压处于一种不受约束的自由状态。只有和电压闭环结合，成为双环后，才能实现控制目的。因此，等效阻抗匹配方法要结合具体应用背景使用。

6 仿真和实验效果

采用 EIM 控制方案，对光伏发电系统 MPPT 问题做 P&O 法、INC 法 3 种控制方式的对比仿真实验，对 EIM 方法的有效性进行检验。

光伏特性的仿真使用 MATLAB 实现^[18]。图 4 为 3 种控制方法在阻性负载下的仿真结果。由图可知：

1) 启动和光照跃变的跟踪时间上 EIM 法最快，次之是 P&O 法，INC 法最慢。同时跟踪曲线以 EIM 法最为光滑，动态跟踪效果优良。良好的动态性能更有益于存在快速光照变化的移动光伏系统中(如太阳能电车)应用。

2) 稳态时，EIM 法的功率输出纹波最小，INC 法略优于 P&O 法，但是后 2 种方法相对 EIM 法来说稳态波动更大，稳态工作时的功率损失也更大。特别是在光照较低の場合，较大的电压纹波会带来很明显的功率跌落。

3) 从功率跟踪精度方面考察，EIM 法最好，跟踪功率的平均值上看更加接近理想值。INC 法也比较理想，P&O 法精度则较低。

4) 3 种方法电压响应都略有超调，EIM 法响应速度最快，稳态的震荡程度也最低。

另外从算法构建上看，EIM 法优势较大，算法更接近传统，工程实现容易；P&O 法次之，算法简单，但参数整定难以兼顾动、静特性要求；INC 法则显得复杂。

使用与仿真相同参数的光伏电池、采用相同变换器、阻性负载条件下应用 EIM 法、INC 法和 P&O 法实现 MPPT 控制的 3 种响应情况示于图 5。EIM 法响应曲线与仿真很吻合，证明了 EIM 法的有效性。

表 1 所示为 3 种算法的启动跟踪响应时间，其中 EIM 法和 INC 法控制周期相同，P&O 法的控制周期是前者的 1/4。即便如此，EIM 法仍然具有更

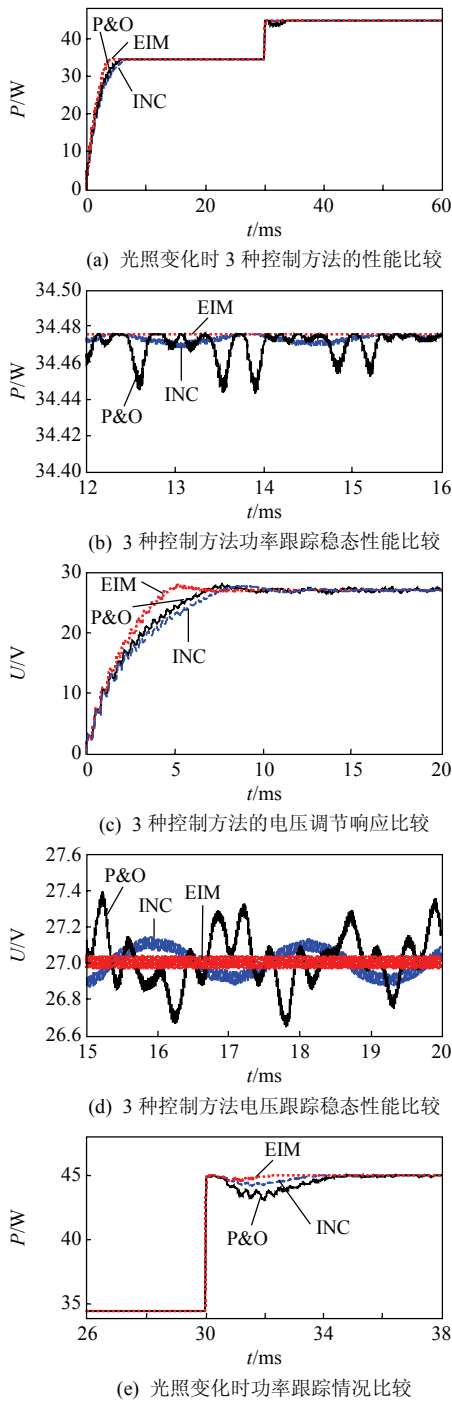


图4 P&O、INC和EIM 3种算法仿真对比
Fig. 4 Simulation comparison of three algorithms

短的响应时间。实验中3种方法启动阶段都有电压超调现象出现,但EIM法调整快速,能更快进入稳态。INC法和P&O法却都经历比较强烈的震荡,然后逐步进入稳定状态,并且稳态工作时仍然存在较大的振荡。

表2为3种算法的跟踪精度测量结果。可以看出EIM法最好,INC法最差。从实验结果看INC法和P&O法与仿真结果不同。分析原因,在于仿

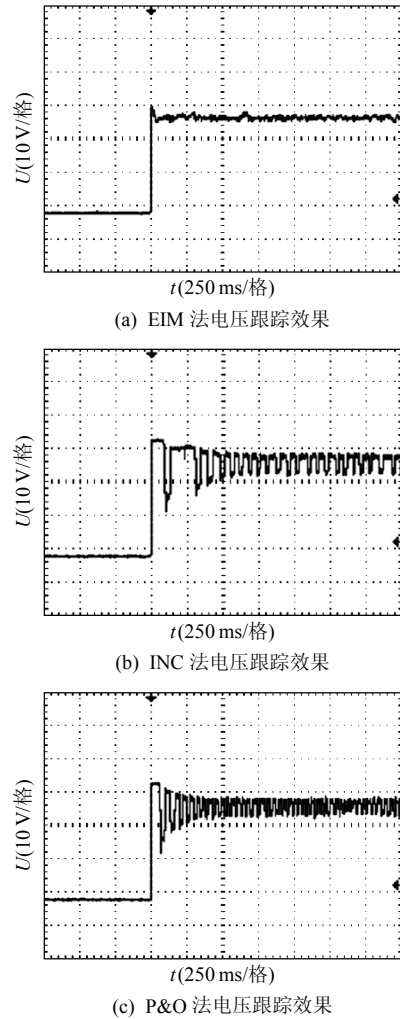


图5 P&O、INC和EIM 3种算法实验对比
Fig. 5 Experimental comparison of three algorithms

表1 3种算法的静态数据
Tab. 1 Static data of three algorithms

算法	启动跟踪时间/ms	稳态电压纹波幅值/V
EIM	50	1
P&O	250	4
INC	300	5

表2 3种算法的稳态跟踪精度数据
Tab. 2 Steady-state tracking precision data of three algorithms

数据组号	开环法	EIM法	P&C法	INC法
1	29.63	28.88	28.50	28.27
2	31.82	31.60	30.37	31.10
3	33.65	33.44	32.08	32.05
4	35.74	35.61	33.40	33.56
5	40.18	39.56	38.93	38.71

真中没有考虑干扰因素。理想状态时,EIM法INC法本应具有相同的精度,但是由于EIM法具有自适应变步长能力,因而有最好的稳态精度而INC法应在其后。但是实践中信号的干扰因素是不可避免的,因此在调整方向判断上INC法更易受到干扰。

因此INC法在实际效果上反受影响。这也和文献[17]的论述相一致。实验中采样控制周期变小但控制效果反而变差正是这个因素的表现。P&O法和INC法的这种实验现象也再次重现和印证了文献[19]中的实验数据和结论，这也与^[20]的研究结论一致。

表3为本方案的多次实验记录与RCC方法^[12]的对比数据。采用EIM方法的实验数据来自于燕山大学实验室光伏系统，实验条件为阻性负载，光伏电池参数与文献[12]基本一致，地点是秦皇岛，时间是2009年9月19日10:20—15:30，约每0.5h测量一次。这种相对效率的对比会因实验环境温度等差异而产生误差，由于温度差异影响较弱，因此认为数据仍然具有较好的可比性。表中RCC方法的测试数据显示不论光电池能够输出的功率是多少，实际的转换功率与光电池的最高功率能力总是存在大约1W的差距，并且随着输出功率的降低，功率跟踪误差有增加的趋势。EIM方法的输出功率的测试数据表明实际的转换功率与光电池的最高功率能力之间也存在差异，但是这个差异小于0.7W。这种现象说明各种跟踪方法都具有输出功率越接近额定值，其跟踪效率越高的类似特征。从总的平均跟踪误差看EIM方法比RCC方法小，显示EIM方法更能接近光伏电池的最高输出功率。

表3 EIM与RCC跟踪精度对比数据

Tab. 3 Comparison of tracking accuracy for EIM and RCC

RCC法			EIM法		
开环/W	闭环/W	误差/%	开环/W	闭环/W	误差/%
16.35	15.37	5.99	16.040	15.270	4.78
18.90	17.88	5.40	18.096	17.416	3.76
21.11	19.91	5.68	20.670	19.903	3.71
22.76	21.56	5.27	23.620	22.760	3.64
25.03	23.90	4.51	25.880	25.500	1.47
26.87	25.70	4.35	27.420	27.100	1.17
29.64	28.61	3.48	31.820	31.600	0.69
31.11	30.22	2.86	33.500	33.320	0.54
33.00	32.07	2.82	34.050	33.840	0.62
35.07	34.06	2.88	35.740	35.610	0.36

7 结论

综上所述，非线性动态等效阻抗概念和阻抗匹配误差调节概念在理论上是正确的，它们可以反映非线性互连系统动态特性；基于等效阻抗匹配的控制方法实现简单，便于工程应用；等效阻抗匹配方法是一种可以用于多机级联系统实现协调控制的可行方案；实现等效阻抗匹配控制的算法简单、动态跟踪迅速、稳态纹波小、能自动实现变步长跟踪。

等效阻抗匹配控制用于光伏发电，可以构成一种具有自适应能力的动态MPPT控制方法。

参考文献

- [1] El-Shibini M A, Rakha H H. Maximum power point tracking technique[C]//Integrating Research, Industry and Education in Energy and Communication Engineering MELECON'89. Lis-bon, Portugal, 1989: 21-24.
- [2] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1145-1153.
Zhou Lin, Wu Jian, Li Qiu-hua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1145-1153(in Chinese).
- [3] D'Souza N S, Lopes L A C, Liu X. An intelligent maximum power point tracker using peak current control[J]. IEEE 36th Annu. Power Electronics Specialists Conference, 2005: 172-177.
- [4] 邱关源. 电路[M]. 高等教育出版社, 北京: 2000: 395-396.
Qiu Guanyuan. Circuit[M]. China Higher Education Press (CHEP), Beijing, 2000: 395-396(in Chinese).
- [5] 孙元福. 关于最大功率输出的探讨[J]. 中国民航学院学报, 1997, 1(15): 61-67.
Sun Yuanfu. A probing study on maximum power output[J]. Journal of Civil Aviation Institute of China, 1997, 1(15): 61-67(in Chinese).
- [6] Chang Liuchen, Diduch Chris, Song Pinggang. Development of standards for interconnecting distributed generators with electric power systems[C]//Power Electronics Specialists Conference, Recife Brazil, 2005.
- [7] Deepak Divan, Harjeet Johan. Distributed FACTS-a new concept for realizing grid power flow control[C]//Power Electronics Specialists Conference, Recife Brazil, 2005.
- [8] Mekhilef S, Ahmed M E, Younis M A A. Performance of grid connected photovoltaic inverter with maximum power point tracker and power factor control[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Niagara Falls ON, Canada, 2008.
- [9] Supatti Uthane, Peng Fang Z. Z-source inverter based wind power generation system[C]//International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, Singapore, 2008.
- [10] Brambilla A, Gambarara M, Garutti A, et al. New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking[C]//Power Electronics Specialists Conference, Charleston, SC, USA, 1999.
- [11] ESRAM T, Kimball J W, Krein P T, et al. Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2006, 21(5): 1282-1291.
- [12] 魏晋云. 太阳能电池效率与串联电阻近似指数关系[J]. 太阳能学报, 2004, 25(3): 356-358.
Wei Jinyun. An approximately exponential characteristic of efficiency and series resistance of solar cells[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2004, 25(3): 356-358(in Chinese).
- [13] 同济大学应用数学系. 高等数学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 154-160.
Department of Applied Mathematics Tongji University. Higher Mathematics[M]. Beijing: China Higher Education Press (CHEP), Beijing, 2001: 154-160(in Chinese).
- [14] Kimiyoshi Kobayashi, Hirofumi Matsuo, Yutaka Sekine. An excellent

- operating point tracker of the solar: cell power supply system[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 495-449.
- [15] Jain S, Agarwal V. A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems[J]. IEEE Power Electron. Lett, 2004, 2(1): 16-19.
- [16] Koizumi H, Kurokawa K. A novel maximum power point tracking method for PV module integrated converter[J]. IEEE 36th Annu. Power Electron, Specialists Conference, 2005: 2081-2086.
- [17] 何金满, 曾创伟. 阻抗匹配法之太阳光伏系统最大功率点追踪技术探讨[J]. 先进工程学报, 2006, 1(1): 49-54.
He Jinman, Zeng Chuangwei. Analysis of impedance matching theory for the maximum power point tracking of photovoltaic energy conversion system[J]. Journal of Advanced Engineering, 2006, 1(1): 49-54(in Chinese).
- [18] 吴海涛, 孔娟, 夏东伟. 基于 MATLAB/Simulink 的光伏电池建模与仿真[J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2006, 121(4): 74-77.
Wu Haitao, Kong Juan, Xia Dongwei. The model and simulation of PV cell based on MATLAB/Simulink[J]. Journal of Qingdao University: E&T Edition, 2006, 121(4): 74-77(in Chinese).
- [19] Hohm D P, Ropp M E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms[J]. Prog Photovolt: Res Appl, 2003(11): 47-62.
- [20] Wells J R, Chapman P L, Krein P T. Fundamental aspects of ripple correlation control of electric machinery[C]//Power Electronics Specialists Conference, Acapulco, NM, United states, 2003.



郑颖楠

收稿日期: 2010-08-20。

作者简介:

郑颖楠(1955), 男, 教授, 主要从事光伏、风力发电与变换技术研究, yingnanzheng@ysu.edu.cn;

王俊平(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电最大功率点跟踪技术。

(责任编辑 张媛媛)