

含电动汽车储能与分布式风力发电的 虚拟发电厂优化运行

陈 炜

(国网北京经济技术研究院,北京 102209)

摘要: 利用电动汽车作为储能解决风力发电的不足,联合配电网中的分布式风力发电与电动汽车形成虚拟发电厂,参与到日前电力市场中。通过对虚拟发电厂市场化建模,利用滚动时域分析方法,分析对比了无电动汽车参与的虚拟发电厂和含电动汽车储能的虚拟发电厂在效益方面的表现。针对电动汽车与分布式风力发电单元所有者不同以及电动汽车储能电池参与虚拟发电厂后会造成损耗的问题,对电动汽车的补偿机制进行分析说明。算例分析表明,相比于无电动汽车储能的虚拟发电厂,含电动汽车储能的虚拟发电厂的整体效益得到了很大程度的提升。同时,所提电动汽车补偿机制可有效地激励车主参与虚拟发电厂的运营。

关键词: 日前电力市场; 分布式风力发电; 电动汽车; 虚拟发电厂; 补偿机制

中图分类号: TM 732;U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.007

0 引言

近些年来,随着电网中分布式发电资源 DER (Distributed Energy Resources)的不断增多,国内外学者针对 DER 的研究也越来越深入。其中,针对风力发电的研究与应用尤为突出。在欧洲,风力发电的发电量已在总发电量中占据了很高的比例。其中,西班牙风力发电占总发电量的 11%,丹麦风力发电所占比例更是达到了 20%^[1]。虽然风力发电以其环保、成本相对其他可再生能源较低的优势得到了较好的应用与发展,但风力发电有着很明显的短板,限制了其更加广泛的普及与应用^[2-3]。风力发电的不确定性与预测误差大的特点,给电网运营商造成了很大的困扰。风力发电一般在夜晚出力达到最大,而此时的电力需求较低,且电价也较低^[4-5]。因此,从经济学角度而言,相对于其他成熟的发电形式,风力发电在电力市场中则缺少了一定的竞争优势。

针对以上问题,许多国家都给予风电高于市场价格的上网补贴。但是随着风电的发展规模越来越大,对风力发电给予上网补贴显然不是一个长久之计。基于此,需要研究一个更适用于风力发电发展的策略,使其可以更加合理地参与到电力市场的运营中。

近年来国内外研究学者提出了虚拟发电厂 VPP (Virtual Power Plant)技术^[6]。VPP 可认为是通过先进的通信技术与软件管理系统将配电网中的 DER 聚合与优化,作为一个特别的电厂参与到电网运行中,进而协调电网与 DER 的矛盾^[7-8]。储能作为平衡

风力发电的一种有效手段得到了广泛共识,但是储能因其高成本的缺点,不能得到广泛的推广使用。但电动汽车作为电力系统中的一种储能应用形式有着很大的潜力,其在配电网中可与分布式风力发电单元配合,进而平衡分布式风力发电的不确定性。为此,本文利用电动汽车储能解决风力发电的不足,联合配电网中的分布式风力发电单元与电动汽车形成 VPP,参与到日前电力市场中。

针对储能与其他发电资源联合发电的形式,文献[9]分析了储能与风电联合发电的经济效益,并利用动态规划的方法分析了该组合形式在电力市场环境下的运行形式。但该文献中的储能与风力发电属于同一所有者,而本文所提出的利用电动汽车作为储能形式的方法,电动汽车与风力发电的所有者不属于同一个所有者。文献[10]研究了微型燃气轮机与风力发电的协调运行机制,使之形成一个 VPP,进而研究 VPP 的在线协调控制机制。文献[11]基于多代理方法研究了以聚合形式出现的电动汽车向电网输送电能的机制与方法,但主要是以监管者的角度进行分析研究,而非供电方角度。文献[12]考虑风电电源与电动汽车充放电负荷的双随机性,以最大化动态条件风险备用为目标,建立了电力系统短期充裕性多阶段决策模型,实现了在购电成本约束下,电力公司购买不同类型电源的配比决策和电动汽车调度方案优化。文献[13]计及电动汽车数量与风电机组出力的不确定性,同时在一系列假设的基础上研究了含电动汽车和风电机组的 VPP 协同竞价问题。

本文通过对 VPP 市场化建模,利用滚动时域分析方法,分析对比相对于无电动汽车参与的由配电网中分布式风力发电单元所构成的 VPP,电动汽车与分布式风力发电单元联合所构成的 VPP 在效益

收稿日期:2015-10-09;修回日期:2016-08-29

基金项目:国家电网公司科技项目(5205A0160002)

Project supported by the Science and Technology Research Program of SGCC(5205A0160002)

方面的表现。针对电动汽车储能电池参与 VPP 后造成损耗的问题,对其补偿机制进行了分析研究。

1 市场环境下 VPP 模型建立

本文所提及的市场环境下 VPP 的参与方为配电网内分布式风力发电单元与电动汽车。因参与 VPP 运行后,电动汽车受 VPP 的统一控制,因此,本文不考虑电动汽车充放电的随机性问题。同时,由于风电的预测准确性较差,本文所指 VPP 参与的市场为日前电力市场。

在日前电力市场中的第 $k-1$ 日,VPP 上报分时段的第 k 日电量供应策略。其中风力发电的出力基于第 k 日的天气预报,同时考虑到愿意参与到第 k 日 VPP 中的电动汽车的数量,风力发电运营商计算出在日前电力市场中,第 k 日最有利的供应策略所需的电动汽车的数量。在第 k 日的实际运行中,基于 VPP 的实际运行情况,同时依据前一日所制定的合同,为了保证 VPP 运营效益最大化,虚拟发电厂运行控制中心 VPPCC(Virtual Power Plant Control Center)进行持续优化。

如前所述,VPP 于第 $k-1$ 日上报分时段的第 k 日的供电策略,设 $z(n)$ 为第 n 个时段 VPP 预测可以产生的电量,电量 $z(n)$ 可以直接输送至电网,也可向电动汽车充电,或二者同时进行。此外,在相同时间段内,VPP 也可利用之前存储在电动汽车中的电量,与 $z(n)$ 一起向电网传输。具体在第 n 个时段采取什么样的方式,取决于当时的市场价格以及利用电动汽车储能所产生的费用。

1.1 电动汽车补偿机制

一般情况下,配电网中的分布式风力发电单元与电动汽车的所有者不同,分布式风力发电单元一般属于风电运营商,而电动汽车则属于具体的电动汽车拥有者。同时,由于电动汽车参与到 VPP 中势必会使充放电的频率增多,这就会使电动汽车的电池寿命缩短。所以,建立一套电动汽车补偿机制,使得电动汽车车主愿意参与到 VPP 运营中就显得尤为重要。

在本文中,电动汽车的补偿机制并不是通过直接向电动汽车车主发放补贴的方式体现。在电力市场电价机制中有零售电价与批发电价,零售电价通常要高于批发电价,通过利用这 2 种电价之间的差异则可建立电动汽车补偿机制。需要指出,在建立补偿机制时并不需要考虑输配电费用,因为该费用已作为前期电动汽车充电设备安装费用的一部分向电动汽车车主收取。

对于 VPP 而言,其向电网输电时是按批发电价计算获得收益的。而对于电动汽车车主而言,当电动

汽车充电时,电网是按零售电价计算收取费用的。如果电动汽车参与到 VPP 运行中,那么 VPP 为其充电将不再收取费用。作为回报,电动汽车需要参与到 VPP 的整体运行中,成为 VPP 的一部分。例如,设批发电价为 0.2 元/(kW·h),零售电价为 0.4 元/(kW·h)。VPP 每向电动汽车输送 1 kW·h 的电量,将会减少其向电网供电所获得的 0.2 元的收益,但电动汽车车主则免去了向电网缴纳 0.4 元的费用。虽然 VPP 减少了向电网的售电量,但 VPP 可通过利用这种补偿机制所争取到的电动汽车储能,形成一个范围更大、更加稳定的 VPP,进而更好地参与到电力市场中以获取更高的收益。

1.2 电动汽车收益模型

为了体现参与 VPP 运行后对电动汽车电池使用寿命的影响,本文利用文献[14]中所提的方法进行建模。

设 L_{ET} 为在某一特定放电深度 DOD (Depth-Of-Discharge) 下,电池在其使用寿命内的放电总量, c_b 为电池的成本,则电动汽车参与到 VPP 中的损耗 C_{EV} 为:

$$C_{EV} = \frac{c_b E_s(DOD)}{L_{ET}} \quad (1)$$

其中, $E_s(DOD)$ 为 VPP 在储能电池特定的放电深度下,利用电动汽车储能电池的容量。电池寿命一般通过可充电次数来表达,即通过特定的放电深度描述,即:

$$L_{ET} = L(DOD) E_s(DOD) \quad (2)$$

其中, $L(DOD)$ 为某一放电深度下电动汽车电池的使用寿命。

因此,电动汽车参与到 VPP 中的损耗 C_{EV} 为:

$$C_{EV} = \frac{c_b}{L(DOD)} \quad (3)$$

本文利用文献[15]中所提的电动汽车储能电池放电深度与可利用次数间的关系,具体如表 1 所示。

表 1 不同放电深度下的可充电次数
Table 1 Life cycles for different values of DOD

放电深度/%	可充电次数	放电深度/%	可充电次数
20	50000	60	4000
40	12000	80	2500

作为电动汽车参与 VPP 的补偿,电动汽车会从 VPP 得到一定免费的电能。设 $E_t(DOD)$ 为电动汽车从 VPP 获得的电量,假设零售电价为 0.4 元/(kW·h)。因此,电动汽车的利益函数为:

$$p_{EV} = 0.4 E_t(DOD) - \frac{c_b}{L(DOD)} \quad (4)$$

提供给 VPP 的放电深度是按电动汽车车主的意愿所决定的,较小的放电深度可延长电池的使用

寿命,但同时收益将会减少。相反,较大的放电深度会缩短电池的寿命,但收益将增多。

1.3 VPP 日前市场策略模型

为确定下一日的策略,含电动汽车储能的 VPP 需要确定以下 5 个方面:(1)直接向电网输送的电量,表示为 x ; (2)向电动汽车输送的电量,表示为 b ; (3)电动汽车向电网输送的电量,表示为 d ; (4)VPP 所需利用的电动汽车储能的容量(以确定含电动汽车储能的 VPP 中所需电动汽车的数量),表示为 y ; (5)作为回报向电动汽车输送的电量,表示为 g 。

设 VPP 可利用电动汽车储能容量的最大值为 s (即 y 的最大值), $s=[s(0), s(1), \dots, s(N-1)]^T$, $s(n)=\sum_v s_v(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$), 其中 $v \in V$, V 为一组电动汽车集合。

设 VPP 向电网输送电量(直接输送或从所利用的电动汽车储能输送)时的电价为 $p_e(n)$ 。同时,设作为补偿输送给电动汽车的电量与所需利用的电动汽车储能容量之比为 σ , $\sigma \in [0, 1]$ ($\sigma \leq g(n)/y(n)$)。因通过电网向电动汽车充电时会产生损耗,同时电动汽车储能参与 VPP 运行中后,向电网送电也会产生损耗。故设 $\eta \in (0, 1)$ 为电池的整体转换损失。同时,为了反映每个电动汽车单元真实的输电电量,在数学表达式上需将原先一个单位的输电电量变为 $(1+\eta)$ 个单位的输电电量。

综上,以最大化 VPP 效益建立模型,VPP 日前市场策略模型如下。

目标函数可表示为:

$$\max_{x, b, d, y, g} p(x, d) = \sum_{n=0}^{N-1} p_e(n) [x(n) + d(n)] \quad (5)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} x(n) + (1+\eta)b(n) + g(n) = z(n) \\ \Delta(n) + b(n) \leq y(n) \\ \Delta(n) - d(n) \geq 0 \\ g(n) \geq \sigma y(n) \\ x(n) \geq 0, b(n) \geq 0, d(n) \geq 0, y(n) \geq 0 \\ 0 \leq y(n) + g(n) \leq s(n) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $n=0, 1, \dots, N-1$; N 为总的时段数; $p(x, d)$ 为基于预测产生的电量 z , VPP 向电网输送电能所获得的收益; $\Delta(n)$ 为时段 n 开始时电动汽车中所储存的电量,可表示为式(7)。

$$\Delta(n) = \begin{cases} 0 & n=0 \\ \sum_{i=0}^{n-1} [b(i) - d(i)] & n \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(6)中,第 1 个约束条件为时段 n 直接送向电网的电量 $x(n)$ 、转化储存在电动汽车储能中的电量 $b(n)$ 、作为参与补偿输送给电动汽车的电量 $g(n)$ 三

者之和等于 VPP 预测产生的电量 $z(n)$; 第 2 个约束条件保证了有足够的电动汽车满足需要存储的电量; 第 3 个约束条件保证了电动汽车中存储的电量满足输出的要求; 第 4 个约束条件保证电动汽车所获得的补偿电量至少达到 VPP 所需利用储能容量的规定比例(即 σ)。

2 滚动时域优化方法

为解决大规模优化决策中计算难处理的问题与反映复杂动态环境的优化决策过程,控制领域在 20 世纪 70 年代提出了滚动时域控制和预测控制概念。预测控制与传统的最优控制有着很大的不同,预测控制因其基本原理对于复杂工业环境有着很强的适应性,使其在工业过程中得到了广泛的应用。这些原理主要包含模型预测、滚动优化、反馈矫正。滚动时域优化方法是借鉴预测控制的思想,通过预测模型计算该时段内的最优控制,并将得到的最优策略应用到该时段内。到下一个时间段的起点时,系统状态再次更新,滚动时域控制再次计算该时段的最优控制,依此类推。预测控制中的滚动时域方法实质上是利用随时间反复进行的一系列小规模优化问题求解的过程取代一个静态的大规模优化问题求解的结果,从而达到在优化前提下降低计算量并适应不确定性的目的^[16]。

从时间维度而言,滚动时域优化方法在有限时域内采用滚动式的优化策略,也就意味着该优化策略不是一次完成的,而是随着时间的推移反复进行,即优化策略只是在基于当前采样时间之后的未来有限时间段内进行,并在基于当前采样时间的滚动窗口内执行决策结果。在下一个采样时间点,优化时段会向后移动。所以滚动时域优化方法不是以一个对整体相同的优化指标,而是在每个采样时间都有一个相对于该时段的局部优化指标。这 2 种优化指标在形式上是相同的,但其包含的时间段不同^[17]。

从问题维度而言,滚动时域优化方法将一个整体的问题分拆成若干个子问题。根据在采样时间之前所获得的反馈信息和当前预测窗口的预测信息,在每个采样时间做出决策,进而解决当前时段的子问题^[17]。

3 基于滚动时域优化方法的 VPP 日前市场策略模型

在电能输送的第 k 日当天,越接近每个时间段,越能更加准确地预测该时间段所产生的电量。在第 k 日的任意时间段内,因第 $k-1$ 日预测会出现误差,1.3 节中的模型需要进行一定的调整,以适应这一误差。

为此,针对上述问题,本文利用滚动时域优化方法进行处理。设 $\mathbf{z}'_t=[z'_t(t), z'_t(t+1), \dots, z'_t(N-1)]^T$ 为一天内剩余 $N-t$ 个时间段在时段 t 已知的新预测 VPP 产生的出力, $z'_t(t), z'_t(t+1), \dots, z'_t(N-1)$ 分别为时段 t 对时段 $t, t+1, \dots, N-1$ 的预测出力。同理, $\mathbf{s}'_t=[s'_t(t), s'_t(t+1), \dots, s'_t(N-1)]^T$ 为一天内剩余 $N-t$ 个时间段在时段 t VPP 可以利用的储能容量新的最大值。设 p_{up} 为实际的送电量小于日前市场所签订的合同值时的惩罚费用。但是,如果送电量高于合同值,多送出的电量的价格不高于合同所签订的价格 p_e ,这 2 个价格的差异(合同价格减去实际的盈余价格)用 p_{down} 表示。即: $p_{\text{down}}(n)=p_e(n)-p_{\text{surplus}}(n)$, 其中 $p_{\text{surplus}}(n)$ 为时段 n 多送出电量的价格。由此可得 $p_{\text{down}} \geq 0$ 。

在每个时间段 t , 根据日前市场签订的合同,即 VPP 需要提供 $\mathbf{w}(\mathbf{w}=\mathbf{x}+\mathbf{d})$ 的电量,含电动汽车储能的 VPP 现需要计算出针对 1.3 节中所提到的 5 个量对于一天中剩余的 $N-t$ 个时间段的更新量 $\mathbf{x}'_t, \mathbf{b}'_t, \mathbf{d}'_t, \mathbf{g}'_t, \mathbf{y}'_t$ 。因此新的供应电量为 $\mathbf{w}'_t=\mathbf{x}'_t+\mathbf{d}'_t$, 需要在每个时段 t 都计算一遍,其中 $t \in \{0, 1, \dots, N-1\}$ 。同时, $\mathbf{u}^{\text{up}}_t$ 为在时段 t 少送出的电量值, $\mathbf{u}^{\text{up}}_t=[\max(0, w(t)-w'_t(t)), \max(0, w(t+1)-w'_t(t+1)), \dots, \max(0, w(N-1)-w'_t(N-1))]$, 同理 $\mathbf{u}^{\text{down}}_t$ 为在时段 t 多送出的电量值, $\mathbf{u}^{\text{down}}_t=[\max(0, w'_t(t)-w(t)), \max(0, w'_t(t+1)-w(t+1)), \dots, \max(0, w'_t(N-1)-w(N-1))]$ 。

因此,综上所述,考虑了不平衡惩罚量的 VPP 利益函数为:

$$p'_t(\mathbf{x}'_t, \mathbf{d}'_t) = \sum_{n=0}^{N-1} p_e(n) [x'_t(n) + d'_t(n)] - \sum_{n=0}^{N-1} p_{\text{up}}(n) u^{\text{up}}_t(n) - \sum_{n=0}^{N-1} p_{\text{down}}(n) + u^{\text{down}}_t(n) \quad (8)$$

3.1 目标函数

尽管式(8)为凹函数,但由于其含有 $\max$ 函数,故不是处处可微,因此将式(8)修改成式(9)。

为此,基于滚动时域优化方法的 VPP 日前市场策略模型的目标函数为:

$$\max_{\mathbf{x}'_t, \mathbf{b}'_t, \mathbf{d}'_t, \mathbf{y}'_t, \mathbf{g}'_t, \alpha, \beta} p'_t(\mathbf{x}'_t, \mathbf{d}'_t) = \sum_{n=t}^{N-1} p_e(n) [x'_t(n) + d'_t(n)] - \sum_{n=t}^{N-1} p_{\text{up}}(n) \alpha(n) - \sum_{n=t}^{N-1} p_{\text{down}}(n) \beta(n) \quad (9)$$

其中, $\alpha(n), \beta(n)$ 为去除式(8)中不可微量的变量。

3.2 约束条件

(1) 能量平衡约束。

$$x'_t(n) + (1+\eta) b'_t(n) + g'_t(n) = z'_t(n) \quad (10)$$

该约束条件为每个时段 t 直接送向电网的电量 $x'_t(n)$ 、转化储存在电池中的电量 $b'_t(n)$ 、作为补偿输送给电动汽车的电量 $g'_t(n)$ 三者之和等于 VPP 每个时段 t 产生的电量 $z'_t(n)$ 。其中, $n \in (t, t+1, \dots,$

$N-1)$ 。

(2) 所需储能约束。

$$B_t + \Delta'_t(n) + b'_t(n) \leq y'_t(n) \quad (11)$$

该约束条件保证了在每个时段 t 有足够的电动汽车满足所需存储的电量。其中, B_t 为每个时段 t 电动汽车的电量; $y'_t(n)$ 为每个时段 t 需要利用电动汽车储能的容量; $\Delta'_t(n)$ 为每个时段 t 电动汽车储存的电量,可表示为:

$$\Delta'_t(n) = \begin{cases} 0 & n=t \\ \sum_{i=0}^{n-1} [b'_t(i) - d'_t(i)] & n \neq t \end{cases} \quad (12)$$

(3) 输出约束。

$$B_t + \Delta'_t(n) - d'_t(n) \geq 0 \quad (13)$$

该约束条件保证了在每个时段 t 内电动汽车中所储存的电量满足输出的要求。其中, $d'_t(n)$ 为每个时段 t 电动汽车向电网输送的电量。

(4) 消耗补偿约束。

$$g'_t(n) \geq \sigma y'_t(n) \quad (14)$$

该约束条件保证了在每个时段 t 内电动汽车所获得的补偿电量至少达到 VPP 所需利用储能容量的规定比例(即 σ)。其中, $g'_t(n)$ 为每个时段 t 作为回报向电动汽车输送的电量。

(5) VPP 需求约束。

$$0 \leq g'_t(n) + y'_t(n) \leq s'_t(n) \quad (15)$$

该约束条件保证了在每个时段 t 内作为回报向电动汽车输送的电量与 VPP 所需利用的储能容量之和不能大于 VPP 所能利用储能的最大值。其中, $s'_t(n)$ 为每个时段 t VPP 所能利用储能容量的最大值(即 $y'_t(n)$ 的最大值)。

(6) 其他约束。

$$\begin{aligned} x'_t(n) &\geq 0, b'_t(n) \geq 0, d'_t(n) \geq 0, y'_t(n) \geq 0 \\ \alpha(n) &\geq 0, \beta(n) \geq 0 \\ \alpha(n) + x'_t(n) + d'_t(n) &\geq x(n) + d(n) \\ \beta(n) + x(n) + d(n) &\geq x'_t(n) + d'_t(n) \end{aligned} \quad (16)$$

每天系统运行中,式(9)在每个时段 t 都需要求解一遍,并且在时间段 t 所用的值为: $x'_t(n), b'_t(n), d'_t(n), g'_t(n)$ 。

4 算例分析

4.1 算例描述

为了验证所提模型的有效性,本文选取由 10 个分布式风力发电单元所组成的 VPP 为例进行分析,其中每个分布式风力发电单元的标称功率为 1.3 MW。因需要向下一日市场提交发电策略,风电运营商需要根据下一日 01:00—24:00 的风力预测值,估计计划出力 $\mathbf{z}$ 。同时,为了体现风电的预测误差,本文收

集了某地连续 2 个月 01:00—24:00 的风力预测值以及实际值,然后对时段 t 风力预测误差进行计算,对于每个时段 t 的预测误差,计算其平均值与方差值,最终通过平均值与方差值确定出预测误差的正态分布。为了仿真电力市场价格变动,本文利用某地的历史电价信息^[18]。每个电动汽车电池容量取值为 30 kW·h,总的电池转换参数取为 0.27^[14]。

4.2 算例结果分析

本文通过对比相同地点,相对于无电动汽车储能参与的分布式风力发电单元所构成的 VPP,电动汽车储能与分布式风力发电单元联合所构成的 VPP 在效益方面的优异性。利用 MATLAB 仿真软件实现滚动时域优化方法的求解。设 $p(x,d)$ 为电动汽车储能与分布式风力发电单元相联合所构成的 VPP 参与到目前电力市场所获得的实际效益(即去除作为补贴向电动汽车输送的电量与实际运行中支付市场的不平衡惩罚量后所获得的效益), $p(x,d|s=0)$ 为仅由分布式风力发电单元构成的 VPP 获得的实际效益(即实际运行中支付市场的不平衡惩罚量后所获得的效益)。

本文所提方法多获得的收益以式(17)形式表示:

$$\frac{p(x,d)-p(x,d|s=0)}{p(x,d|s=0)} \tag{17}$$

图 1 给出了不同 σ 取值下每个月含电动汽车储能的 VPP 所多获得的收益, σ 的取值分别为 0.05、0.1、0.15。由图 1 可看出,在风力较大的冬季和春季含电动汽车储能的 VPP 所多获取的收益更多;相对于不含电动汽车储能的 VPP,含电动汽车储能的 VPP 所获得的收益多出了 25% 以上(例如 3 月与 12 月,而在 1 月更是多出将近 45%);当 σ 为 0.05 时,由于利用电动汽车储能相对比较便宜,则 VPP 就会尽可能多地利用储能;但随着 σ 值增大,由于利用储能的代价越来越大,当 σ 取值为 0.1、0.15 时含电动汽车储能的 VPP 所多获取的收益将减少。

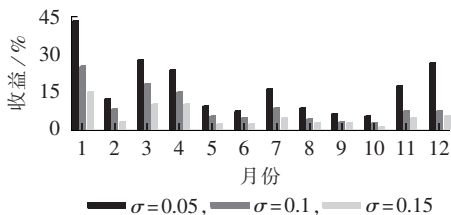


图 1 不同 σ 取值下含电动汽车储能的 VPP 所多获得的收益

Fig.1 Extra profit of VPP with EVs for different values of σ

图 2 给出了含电动汽车储能的 VPP 获取最优收益时,利用电动汽车储能发出的电能所占的百分比。由图 2 可看出,随着利用储能代价的增大(即 σ 值的增加),利用储能所占的百分比随之减少。

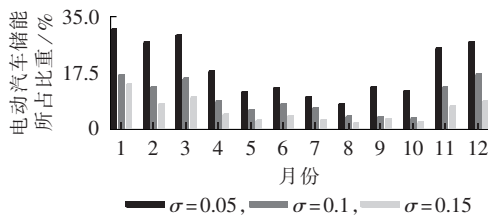


图 2 不同 σ 取值下含电动汽车储能的 VPP 收益最优时电动汽车储能所占百分比

Fig.2 Percentage of EV energy storage in VPP with optimal profit for different values of σ

假设 1 月是 VPP 需要利用储能最多的月份,则当 $\sigma=0.05$ 时,VPP 需要的可利用储能容量为 60 MW·h,当 $\sigma=0.15$ 时,VPP 需要的可利用储能容量为 20 MW·h。由此就产生了一个问题,到底需要多少电动汽车满足最佳储存容量需求。这一问题需要通过分析电动汽车放电深度来解决。假设每辆电动汽车通过提供对其最有益的放电深度向 VPP 提供储能服务,即放电深度为 40% 时(如图 3 所示),则每辆电动汽车可提供 $0.4 \times 30 = 12$ (kW·h) 的容量,VPP 就需要 1667~5000 辆电动汽车以满足 VPP 对储能 20~60 MW·h 的需求。

基于 1.2 节所述的电动汽车收益模型可得不同 σ 与放电深度值下的电动汽车年收益,如图 3 所示。

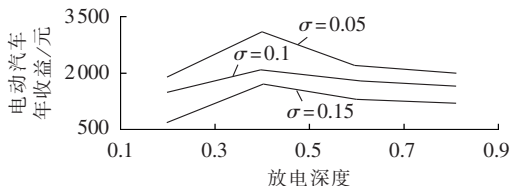


图 3 不同 DOD 取值下电动汽车的年收益

Fig.3 Annual profit of EV for different values of σ

由图 3 可看出,当 $\sigma=0.05$ 时,储能的利用代价较低,较多的电动汽车储能被利用,对于电动汽车车主而言,虽然每次获得的收益较低(免费获得的电力较少),但是从长期的角度而言,因为参与 VPP 运行的次数较多,反而获得了更好的收益。但随着 σ 值的增大,VPP 利用储能的代价增大,故电动汽车储能利用的频率也随之降低,因此电动汽车车主所获得收益也随之减少。由此可看出, σ 值越小,电动汽车储能利用的次数增多,电动汽车车主的收益就会越多,足以满足电动汽车储能电池参与 VPP 后充放电次数增多所造成的损失。当电动汽车储能电池最佳放电利用深度 $DOD=40\%$, $\sigma=0.05$,可充电次数 12000 次,电池容量 30 kW·h,零售电价 0.4 元/(kW·h),电动汽车车主在其储能电池寿命内可由 VPP 获得 57600 元的电能,参考文献[15]所提供的电动汽车储能电池的成本相当于 50400 元,因此电动汽车参与 VPP 所造成的损失足以得到补偿。

5 结论

本文主要研究了 VPP 内部分布式发电资源优化运行方式。为了使风电这类具有间歇性、可预测性差、受自然环境影响较大的新能源能参与到电力市场中,本文利用电动汽车作为储能解决风力发电的不足,联合配电网中的分布式风力发电单元与电动汽车形成 VPP,进而参与到日前电力市场中。

本文建立了日前电力市场环境下的 VPP 模型,该模型以 VPP 效益最大化为目标,对由电动汽车储能与分布式风力发电单元联合构成的 VPP 进行了分析。利用某地风电的实际数据,采用滚动时域分析方法,对本文所提出的模型与机制进行了仿真分析。通过仿真验证了含电动汽车储能的 VPP 在效益方面可获得较大的提升。

同时,由于电动汽车与分布式风力发电单元的所有者不同,本文阐述了电动汽车参与 VPP 运行后的补偿机制,算例表明该补偿机制具有良好的可行性。

利用本文所提出的模式,如何使其他不可控能源与可控能源相配合,以及利用不可控能源在时域、空域间的互补特性,使更多的能源更深入地参与到电力市场中来将是下一步的主要研究内容。

参考文献:

- [1] 汪新园. 大规模风电接入电力系统的可靠性评估及储能策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
WANG Xinyuan. Research on reliability assessment and storage strategy on power system with large-scale wind power penetration[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2013.
- [2] 杜雄,李珊珊,刘义平,等. 直驱风力发电故障穿越控制方法综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):129-135.
DU Xiong,LI Shanhu,LIU Yiping,et al. Review of fault ride-through control for direct-drive wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):129-135.
- [3] 王增平,戴志辉. 含风力发电的配网电流保护运行风险评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):7-12.
WANG Zengping,DAI Zhihui. Operation risk assessment for current protection of distribution network with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):7-12.
- [4] 龚文明,胡书举,许洪华. 一种适用于大型风电场实时仿真的双馈风力发电机响应模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):114-119.
GONG Wenming,HU Shuju,XU Honghua. Response model of DFIG for real-time simulation of large-scale wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):114-119.
- [5] 宋艺航,谭忠富,李欢欢,等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J]. 电网技术,2014,38(3):610-615.
SONG Yihang,TAN Zhongfu,LI Huanhuan,et al. An optimization model combining generation side and energy storage system with demand side to promote accommodation of wind power[J]. Power System Technology,2014,38(3):610-615.
- [6] FENIX. Flexible electricity networks to integrate the expected energy evolution[EB/OL]. (2008-11-01)[2015-08-25]. <http://www.fenix-project.org>.
- [7] 陈春武,李娜,钟朋园,等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J]. 电网技术,2013,37(8):2258-2263.
CHEN Chunwu,LI Na,ZHONG Pengyuan,et al. Review of virtual power plant technology abroad and enlightenment to China[J]. Power System Technology,2013,37(8):2258-2263.
- [8] SABOORI H,MOHAMMADI M,TAGHE R. Virtual Power Plant (VPP),definition,concept,components and types[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Wuhan, China:IEEE Power & Energy Society (PES),2011:1-4.
- [9] CPSTA L M,BOURRY F,JUBAN J,et al. Management of energy storage coordinated with wind power under electricity market conditions[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems,2008. Estoril,Portugal:[s.n.],2008:1-8.
- [10] HOUWING M,PAPAEFTHYMIOU G,HEIJNEN P W,et al. Balancing wind power with virtual power plants of micro-CHPs [C]//IEEE Bucharest PowerTech. Bucharest,Romania:IEEE,2009:1-6.
- [11] KAMBOG S,KEMPTON W,DEKER K S. Deploying power grid-integrated electric vehicles as a multi-agent system[C]//International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems. Taiwan,China:[s.n.],2011:13-20.
- [12] 薛志英,周明,李庚银. 基于条件风险价值的电力系统短期充裕性决策[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):96-104.
XUE Zhiying,ZHOU Ming,LI Gengyin. Short-term adequacy decision of power systems based on CAAR[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):96-104.
- [13] 杨甲甲,赵俊华,文福拴,等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):92-102.
YANG Jiajia,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(13):92-102.
- [14] KEMPTON W,TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources,2005,144(1):268-279.
- [15] DUVALL M,ALEXANDER M. Batteries for electric drive vehicles-status 2005[J]. Electric Power Systems Research,2005,35(11):74-86.
- [16] 王冰. 滚动时域调度方法及其性能分析研究[D]. 上海:上海交通大学,2005.
WANG Bing. Rolling horizon scheduling procedures and performance analysis[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2005.
- [17] 胡训强,谢晓方,孙涛,等. 基于滚动时域优化的机场起降动态调度[J]. 计算机与现代化,2012,201(5):101-105.

(下转第 59 页 continued on page 59)

2012,27(4):1818-1830.

- [17] AHMED N,NORRGA S,NEE H P,et al. HVDC supergrids with modular multilevel converters-the power transmission backbone of the future[C]//2012 9th International Multi-Conference on Systems,Signals and Devices (SSD). Chemnitz, Germany:IEEE,2012:1-7.

- [18] SINHA A K. Linear systems,optimal and robust control[M]. Boca Raton,USA:CRC Press,2007:235-236.

作者简介:

杨文博(1991—),男,广西桂林人,博士研究生,研究方向为柔性交直流输电技术(E-mail:ywb9375@126.com);

宋 强(1975—),男,吉林长春人,副教授,博士,研究方



杨文博

向为大功率电力电子技术和柔性交直流输电技术(E-mail:songqiang@tsinghua.edu.cn);

朱 喆(1981—),男,湖南益阳人,高级工程师,硕士,研究方向为柔性输配电技术和电力电子技术;

李建国(1975—),男,河北衡水人,高级工程师,硕士,研究方向为大功率电力电子技术和柔性交直流输电技术;

许树楷(1978—),男,广东珠海人,教授级高级工程师,博士,研究方向为直流输电技术和电力电子技术;

刘文华(1968—),男,湖南岳阳人,教授,博士,研究方向为大功率电力电子技术和柔性交直流输电技术。

Optimal droop control based on direct DC internal potential control for MMC-MTDC system

YANG Wenbo¹,SONG Qiang¹,ZHU Zhe²,LI Jianguo¹,XU Shukai²,LIU Wenhua¹

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment,Tsinghua University, Beijing 100084,China;2. Electric Power System Research Institute of China Southern Grid,Guangzhou 510080,China)

Abstract: A strategy of droop control based on direct DC internal potential control is proposed for the MMC-MTDC(Modular Multilevel Converter-based Multi-Terminal HVDC) system,which implements the droop characteristics of DC internal potential and DC current in the DC voltage control station while implements the close-loop control of DC current and capacitor voltage in the power control station. The method of optimal parameter design is given based on the analysis of frequency-domain response characteristics. The feasibility and effectiveness of the proposed control strategy are verified by the simulative results.

Key words: HVDC power transmission; modular multilevel converter; multi-terminal DC power transmission; droop control; direct DC internal potential control

(上接第 50 页 continued from page 50)

HU Xunqiang,XIE Xiaofang,SUN Tao,et al. Dynamic departure and landing scheduling in military airport based on receding horizon optimization[J]. Computer and Modernization,2012,201(5):101-105.

- [18] 国家发改委. 国家发展改革委关于福建省峰谷电价有关问题的批复[EB/OL]. (2004-03-19)[2015-08-25]. <http://www.fjjg.gov.cn/fjwj/jgfw/gjjgzc/webinfo/2004/03/1187774413397925.html>.

作者简介:



陈 炜(1985—),男,陕西西安人,工程师,博士,从事智能电网与新能源方面的研究工作(E-mail:wayneblue1223@qq.com)。

Optimal operation of virtual power plant with electric vehicles and distributed wind farms

CHEN Wei

(State Power Economic Research Institute,Beijing 102209,China)

Abstract: As the energy storage,EVs(Electric Vehicles) are combined with the distributed wind farms to form a VPP(Virtual Power Plant) for participating in the day-ahead electricity market. An optimal operation model of VPP in electricity market is established and the rolling time-domain analysis is applied to compare the profit between VPP without EVs and VPP with EVs. Because EV and wind farm have different owners,a mechanism of compensation for EV owners due to the wastage of EV battery is analyzed. Case analysis shows that,the profit of VPP with EVs is greatly improved and the proposed compensation mechanism effectively motivates the EV owners to take part in the operation of VPP.

Key words: day-ahead electricity market; distributed wind power generation; electric vehicles; virtual power plant; compensation mechanism