能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践

慈松^{①②*}, 李宏佳^{①*}, 陈鑫^①, 王强文^③

① 中国科学院声学研究所高性能网络实验室, 北京 100190

② University of Nebraska-Lincoln, NE 68182, USA

③ Nova GreenTech Inc., NE 68130, USA

* 通信作者. E-mail: sci@energyinternet.org, lihj@hpnsl.ac.cn

收稿日期: 2014-02-25; 接受日期: 2014-05-06

国家自然科学基金 (批准号: 60972083, 61302108) 和美国国家自然科学基金 (批准号: 0801736, 0830493) 资助项目

摘要 可再生能源分布式发电的能量波动性以及用户驱动的能量需求的时空随机性, 导致能源互联网中能量流本身具有先天的不确定性与无秩序性, 因此, 分布式储能技术由于可以有效消除能量流的不确定性, 并使能量的时空转移和能量流的有序流动成为可能, 成为能源互联网重要基础支撑. 分布式电池储能作为一种重要的储能方式, 电池单体本身非线性特性与电池成组或成网后单体间的差异性, 使得电池储能系统“管理好”成为真正“使用好”的基础. 但是, 电池成组或成网后将构成复杂巨系统, 这对“管理好”带来巨大的挑战. 因此, 本文基于作者多年理论与技术的成果积累, 总结了一套适用于分布式储能的大规模电池网络优化管理的理论与方法, 包括: 单体和电池组或电池网络的建模与状态参数精确估算; 基于模糊测度的电池网络特征提取及快速计算; 基于自适应动态规划的电池网络优化管理. 随后, 本文将基于能源互联网思想的分布式储能架构及其管理优化方法与技术引入数据中心, 并给出了其在数据中心的实际应用原型系统介绍. 本文工作可以为能源互联网的重要基础支撑——分布式储能技术——的研究与应用提供方法指导与技术支持.

关键词 能源互联网 分布式储能 复杂系统 电池管理 数据中心

1 引言

“化石能源枯竭”, “碳排放量剧增”, “气候环境恶化”, ……, 进入 21 世纪以来, 能源与环境问题就像达摩克利斯之剑一般悬于人类头顶. 为此, 人类做出了不懈的努力: 利用可再生能源减少化石能源消耗, 开发新技术节能降耗. 正在人们坚持不懈地探索解决方法的同时, 产生于信息领域的一种技术正在以前所未有的速度与力度改变着人类世界, 这就是互联网——以最大范围的信息互联共享为基本目标而产生, 不仅已经覆盖到了人类生产生活方面, 甚至颠覆了许多传统行业数十年所保持的运作方式^[1,2]. 当今信息时代, 信息资源成为了一种生产资料, 能够衍生出不同形式的产品、经济效益与价值, 互联网的成功, 就在于实现了信息资源以生产资料的形式在每个人之间互联共享, 从而激发每个人智慧去创造的新的生产力, 推动了各行各业的飞速发展^[3]. 反观能源网络, 以化石能源为主的集中化管

引用格式: 慈松, 李宏佳, 陈鑫, 等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 762–773, doi: 10.1360/N112014-00034

控的电力网络, 阻碍了分布式能量产生与互联共享的变革^[4]. 在互联网思想与应用不断渗透到世界每个角落同时, 能源互联网应运而生, 基于可再生能源的分布式能量生产, 并像互联网中信息共享那样实现能量的互联共享, 以需求驱动的配置能源系统, 从根本上改善能源构成与资源利用率^[5~8].

能源互联网的核心思想与目标可以概括为分布式产生的能量, 本地化能量的供给以及能量的互联互通^[9,10]. 以风能、太阳能、潮汐能等可再生能源为代表的分布式产生的能量具有先天的不确定性或随机性^[11], 如, 分布式光伏系统产生的能量受到云层运动、天气阴晴等瞬息万变的气象条件、四季交替季节条件、部署点环境条件以及所处经纬度地理条件等的影响. 这种能量不确定性一方面将严重影响能量供给与共享的安全性、稳定性与可靠性^[12]; 另一方面, 能源互联网中的能量互联共享是像互联网中信息互联共享, 即, 用户侧驱动的能量互联共享, 因此, 由于分布式能量源的不确定性与用户需求的时空随机性, 从任意时刻看, 多空间点分布式能量源与用户驱动的能量需求之间自发的平衡显然是不可能, 分布式产生的能量将无秩序的从低熵的能量源流向高熵的负载, 最终, 流向高熵值负载的能量随意的做了有用功或做无用功, 能量流无秩序流动导致其有效利用率极低^[13].

这种能量源的不确定性与能量流的无秩序性使得分布式储能成为解决上述能源互联网两大问题的支撑性基础, 即, 以分布式储能平滑能量源的不确定性并为能量的时空转移和能量流的有序流动提供基础.

当今, 分布式储能有着多种方式或载体, 例如, 电池、飞轮、抽水、超级电容以及压缩空气等, 而电池储能方式在千瓦级至兆瓦级储能有着其他储能方式不可比拟的优势. 锂离子电池储能作为电池储能最具前景的方式之一, 小容量单体成组或成网在储能系统的安全性, 可靠性和可管性方面有着大容量单体不可比拟的优势, 这一点已被众多实际应用证实, 例如, 特斯拉 Model S 电力汽车采用了 8127 节 18 650 (即, 直径 18 mm, 高 65 mm 的圆柱形电池) 小容量单体电池^[14].

大量单体电池成组或成网后将构成复杂的储能系统, 这给分布式储能系统的内部管理带来了巨大的挑战:

从电池本身来看, 首先, 电池本身性能受到多维变量的影响^[15], 例如, 受到温度、电压、电流、荷电状态 (SOC)、老化程度及个体差异等多种因素的影响, 这种影响表现有: 低温下电池内部物质的活性下降、高温下电池的稳定性下降、大电流下电池的放电容量骤降、电池老化后其容量下降等; 其次, 电池与多维影响变量间呈现非线性关系^[16], 例如, 温度、电流对电池直流内阻和极化电压等的关系, 以及电池放电容量和倍率特性等呈现明显的非线性关系, 电池的放电电流与电池的欧姆压降和极化电压的关系; 第三, 电池单体间具有无法避免的不一致性^[17], 即便是同厂家, 同批次的电池, 在自放电特性、温度特性、容量、内阻等方面的参数都存在较大的差异, 不同厂家的电池单体间的不一致性更是不言而喻.

从方法论来看, 大量单体电池成组或成网后将构成复杂系统, 对于这种复杂系统优化管理的基础是对复杂系统模型的定量描述, 而在复杂系统建模描述中最重要的是定量描述单体间参数的相互依赖关系以及这种关系对电池成组或成网后系统优化的影响, 而不仅仅是一种定性模糊的描述, 或者割裂各个电池单体以及电池组内在关系的定量描述. 此外, 由于分布式产生的能量以及用户驱动的能量需求的时空不确定性与随机性, 使得这些参量间相互依赖关系的定量分析变得更具有挑战性. 而传统的监督学习和加强学习^[18]只能定性而无法定量的刻画系统动态特征, 无法提供一致合理的工程判断. 另外, 大规模电池组或电池网络的优化管理属于巨维度优化问题, 优化算法通常随着优化中相关变量维度的增加成指数倍增加, 而传统算法无法实现实时, 高精度, 以及快速收敛, 导致大电池组或电池网络优化管理算法具有工程实用性差的问题.

图 1 (网络版彩图) 双层储能电池网络拓扑示意图

Figure 1 (Color online) Two-tier battery network topology

综上, 针对上述挑战, 本文后续首先介绍了基于复杂系统理论实现电池网络动态优化管理的 3 个核心方法, 并介绍了如何将基于能源互联网思想的分布式储能架构及其管理优化方法与技术引入与人类生存空间同样存在能量受限问题的数据中心, 最后给出了在数据中心中实际应用系统的介绍。

2 基于复杂系统理论的分布式储能系统优化管理方法

如前所述, 分布式储能是能源互联网研究与发展的支撑性基础之一。分布式储能系统应用中, 为了满足所需分布式储能系统的电流, 电压或功率要求, 单体电池可以以相应的拓扑形式 (串联, 并联以及互联联接) 直接成组或成网, 也可以由满足一定电流, 电压或功率要求的标准电池组再以某种拓扑形式联接, 显然后者可以以更低的成本满足不同量级和应用场景的分布式储能需求, 并且更易于扩容与维护, 图 1 给出以后者思想给出的两级互联的双层分布式储能电池网络拓扑。另外, 为了实现双层电池网络的优化管理, 图 1 中电池网络中内层电池网络与外层电池网络包含信息与能量的互联。

显然, 内层电池网络已经构成了一个复杂网络系统, 结合外层网络, 则对整个本地分布式储能系统的电池管理成为一个大规模复杂网络的动态优化问题, 称为“大规模电池网络优化问题”, 而单点 (电池单体) 及其组合方式是影响大规模复杂网络特性的重要因素。要实现有效的分布式储能系统电池管理, 解决大规模电池网络优化问题, 必须充分掌握单点的特性和状态, 以及单点按照不同拓扑结构构成的网络特性, 继而通过动态调整单点状态和电池网络拓扑结构等来优化整个分布式储能系统的性能。

根据上述分析, 本文介绍了实现电池网络动态优化管理的 3 个核心方法: 单体和电池组或电池网络的建模与状态参数精确估算; 基于模糊测度的电池网络特征提取; 基于自适应动态规划的电池网络优化管理方法。下面对它们进行详细介绍。

2.1 单体和电池组或电池网络的建模与状态参数精确估算

在综合考虑电池使用过程中的非线性特性基础上, 建立基于电路模型的单体和电池网络通用数学模型, 基于该模型实时地对 SOC (荷电状态) 进行高精度, 低复杂度的估算。

(1) 基于通用数学模型的单体电池建模及 SOC 精准估算

SOC 的准确估算是进行电池网络优化管理的重要参考依据, 但是, 电池在使用过程中表现的高度

图 2 (网络版彩图) 单体电池的等效电路模型

Figure 2 (Color online) Circuit-based single battery model

图 3 (网络版彩图) 电池网络的拓扑等效变化示意图

Figure 3 (Color online) Equivalent changes of battery network topology

非线性, 使准确估计 SOC 一直是电池优化管理的瓶颈. 电池的非线性因素主要包括: 充放电倍率, 电池的自恢复特性, 环境温度, 电池老化以及单体电池间的差异性, 这些非线性影响因素都为单体电池 SOC 的精确估值提出了挑战.

因此, 本文首先介绍了基于电路与通用数学模型的单体电池建模及 SOC 精准估算技术, 在综合考虑电池工作中的各种非线性特性的基础上, 建立单体电池的等效电路模型, 如图 2 所示.

该模型由两部分组成. 第一部分由代表电解液反应内阻的 R , 代表电池欧姆内阻的 R_S 和与之相关的电容 C_S , 以及代表能量损失的电阻 R_L 和与之相关的电容 C_L 组成; 第二部分由代表电池自放特性的 R_T 与 φ_C 组成, 进而通过实验测试与在线参数估计算法, 包括最小二乘法^[19], 神经网络法^[20], 卡尔曼 (Kalman) 滤波法^[21] 等对等效电路模型参数进行估计. 等效电路模型可以准确的体现电池的动态特性 (例如, 非线性开路电压, 温度影响, 老化与自放电等), 电路模型中可变电容用以等效电池的自恢复特性. 进一步的, 通过电池等效电路模型可建立对应的电路方程, 进而对电池组的荷电状态, 有效容量, 输出电压, 内阻等进行准确估计, 详见本文作者前期成果^[22].

(2) 电池组或电池网络拓扑简化方法

基于前述单体电池模型, 根据单体电池不同的连接方式对电池网络特性进行建模. 根据电路理论, 单体电池的连接方式主要有串联与并联两种, 而任何一种复杂的电池连接方式或拓扑均可以等效为串联或并联电池电路. 因此, 针对不同拓扑的电池网络建模采用逐层拓扑简化, 逐次迭代的方式进行.

如图 3 所示, 首先根据单体电池模型建立 N 电池串联与 M 电池并联模型, N 与 M 分别为串并联

电池数目, 将串并联电路分别等效为单体电池模型, 设为 $f(N)$ 和 $g(M)$, 进而将所给电池网络中的直观串联与并联电路用 $f(N_0)$ 和 $g(M_0)$ 代表的单体电池代替 (所谓直观电路指串并联电路中的最小单元为单体电池), 其中 N_0 和 M_0 为直观串并电路的单体电池数.

经过一次等效后, 原有电池网络被简化为由串并联电路等效后的等效单体电池组成的新网络. 进而执行二次等效, 即采用一次等效相似的方法, 在一次等效后的新网络中将直观串并联电路等效为单体电池, 相应模型为 $f(f(N_0^1), \dots, f(N_0^{N_1}))$ 和 $g((g(M_0^1), \dots, g(M_0^{M_1})))$, 其中, N_1 和 M_1 为二次等效时串并联电路的电池数目. 重复上述步骤, 直至所给电池网络最终等效为一个单体电池模型, 则完成了对任意拓扑的电池网络的建模. 基本串并联电路的建模方式以前述单体电池的电路模型为基础, 通过单体电池电路串并联建立数学模型.

2.2 基于模糊测度的电池网络特征提取

电池网络特征量化建模是其优化管理的基础, 因此, 本文提出基于非加性测度理论提取复杂网络系统动态特征的方法, 用以解决大规模电池组或电池网络中变量之间相互作用的定量描述问题, 并可广泛应用于基于认知技术的复杂网络系统动态特征自动提取中.

具体而言, 在复杂网络系统的建模和优化问题中, 最重要的是复杂网络系统动态特征的量化, 即应该清楚的描述各种系统参数之间的相互依赖关系及这种依赖关系对系统整体性能的影响, 而不仅仅是一种定性模糊的描述. 然而, 由于复杂网络系统的不确定性和随机性, 对相互依赖变量的定量分析变得非常具有挑战性. 此外, 传统的监督学习和加强学习只能定性而无法定量的刻画系统动态特征, 无法提供一致合理的工程判断.

为此, 本文基于非加性测度理论介绍一种新的参数相互作用关系的定量测度方法^[23], 该方法的突出特点是, 系统变量间的相互依赖可以描述为一个定义在控制变量幂集上的集值函数, 通过求解广义非线性 Choquet 积分^[24] 定量测度控制变量间的非加性相互作用及其对系统整体性的影响, 从而为定量地描述动态复杂网络系统的系统行为提供了一个强大的理论工具. 例如, 在电池网络设计中, 模型参数变量包括单体电池温度、单体电池 SOC、单体电池及各支路电流电压, 以及单体电池非线性特性等, 系统性能指标包括单体电池循环寿命、电池系统循环寿命、系统放电时间等. 所以, 网络化模型可要描述如下.

假设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示各个变量, y 表示性能指标关注点. 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. 数据中包含 l 个观察变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 和 y , 可以排列表示如下:

$$\begin{array}{cccccc}
 x_1 & x_2 & \cdots & x_n & y_n \\
 \hline
 f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} & y_1 \\
 f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} & y_2 \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
 f_{l1} & f_{l2} & \cdots & f_{ln} & y_l
 \end{array}$$

其中, 每一行都是对 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 和 y 的观测值. $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的观测可以表示为方程 $f: X \rightarrow (-\infty, +\infty)$; 因此, j 行的 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 观测值可以表示为 $f_{ji} = f_j(x_i)$, $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq l$. 模型参数变量间的相互作用对系统性能的影响可以被描述为一系列方程 u , 在全集 X 下满足的收敛条件. 例如, $u: P(X) \rightarrow (-\infty, +\infty), u(\emptyset) = 0$. 方程集合被称为非叠加测度. 面向目标 z 的预测系统变量观测

值 X 之间的相互作用可以用定义在 X 的幂集上的集合函数描述, 集合函数 μ 满足在空集上是零, 即, $\mu: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{R}$ 且 $\mu(\emptyset) = 0$. 因此, 新型的非可加多回归模型可以表示为

$$z = e + \int_{(c)} f d\mu + N(0, \delta^2),$$

其中, e 是回归常数, $\int_{(c)}$ 是 Choquet 积分, f 是 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的观察量, μ 是模糊测度, $N(0, \delta^2)$ 是期望为 0, 方差为 δ^2 的随即扰动. 数据的观察量 f 的对应于模糊测度 μ 的 Choquet 积分 $\int_{(c)}$ 定义为

$$\int_{(c)} f d\mu = \int_{-\infty}^0 [\mu(F_\alpha) - \mu(X)] d\alpha + \int_0^{+\infty} \mu(F_\alpha) d\alpha.$$

在此, $F_\alpha = \{x \mid f(x) \geq \alpha\}$, $\forall \alpha \in (-\infty, +\infty)$, 被定义为 f 的 α 切割集. 接下来 Choquet 模型的求解分两个基本的步骤: 首先把非线性多回归模型转化为传统的线性回归模型, 把 n 维矢量属性数据转化定义在属性的幂集上的 2^n 维矢量数据; 然后用标准的 LS 方法解线性模型.

基于上述分析, 在给定一组观测数据情况下, 可通过解非线性积分方程导出最优衰退系数, 随后再通过评估设计变量的非叠加测度 u_i 来发掘它们之间复杂依赖关系, 从而实现了通过广义非线性非可加积分定量测量各模型变量间相互作用对整个系统性能优化的贡献值.

2.3 基于自适应动态规划的电池网络优化管理方法

针对大规模电池组或电池网络等复杂网络系统管理优化策略计算复杂度高、无法实时执行等问题. 本文介绍了一种基于量化特征提取和复杂度可变的自适应动态规划算法.

具体而言, 复杂网络系统是一种多尺度的动态异构网络, 因此对其设计, 优化的一个非常重要的任务是提出一种复杂度可扩展的优化框架来适应这种多样性. 通常, 复杂网络系统优化问题可以模型化为一个变分问题并利用拉格朗日对偶和动态规划加以研究和解决. 然而, 动态规划的实际应用通常会受到系统维数和系统环境不确定性的双重挑战. 因此, 基于特征的动态规划方法被广泛采用. 针对现有的特征抽取和参数选择算法主要基于启发式学习方法所带来的局限性, 可采用基于非线性测度的动态特征提取方法和相应的自适应动态规划 (ADP) 算法^[25]. 通过对相互依赖度和敏感性进行定量分析, 确定对应于不同参数子集的状态变量的重要性测度并根据每一参数子集的重要性和敏感性来做相应的参数选择以达到降低状态空间维度的目的. 此外, 不同的参数子集与复杂网络系统优化的复杂度紧密相关, 这样就得到了考虑系统参数相互作用和相互依赖的复杂度可扩展的优化框架. 具体而言, 一个大规模动态规划问题通常定义在一个有限状态空间 S . n 表示 S 的维数, 因此有 $S = 1, \dots, n$, 且 $n = \prod_{k=1}^{\omega} N_k$, N_k 表示参数 $k \in [1, \omega]$ 的控制作用数. 这里首先需要解决的问题是定量描述网络模型参数对网络优化成本函数 J 的产生的影响.

从动态规划的角度来说, 成本向量 J 的各个元素被定义为不同状态的成本值. 成本方程描述了状态到成本值的映射. 因此, 最优成本向量 J^* 在策略 π , 原始状态 i 下定义为 $J_i^{\pi^*} = \min_{\pi} J_i^{\pi}, i \in S$. 同时在状态 i 的最优策略可以定义为

$$\pi_i^{\pi^*} = \arg \min (C_{iu} + \sum_{j \in S} J_j^*), \forall i \in S.$$

在大规模动态规划问题中, 状态空间的大小随着状态变量个数的增长呈现指数级增长, 这使得计算和存储每一个状态方程元素变得非常困难. 因此, 最可行的方法就是将一个大状态空间 ζ^n 映射到一个更小的特征空间 $\zeta^m (m \ll n)$, 一般来说, 压缩表示模型能够描述为使用低维度参数向量 $W \in \zeta^m$

来描述高维度代价向量 $V \in \zeta^m$. 因此, 如果我们能够获得一个近似值 $J \in \zeta^m$ 到 $J^* \in \zeta^m$, 我们仍然能够构造一个近似优化的控制策略 π_j , 但是所需要的计算量将显著的减少了, 而且满足 $\pi_i^{\pi^*} = \arg \min(C_{iu} + \sum_{j \in S} J_j^*), \forall i \in S$.

从近似动态规划的角度来说, 当 J 近似于 J^* 时应该有 π_J 近似于 π^* . 因此, 一种实现状态空间压缩的紧凑表示可以描述为在成本向量的条件下, 从 $J \in \zeta^n$ 到 $W \in \zeta^m$ 的映射 $\tilde{J}(W): \zeta^n \rightarrow \zeta^m$, 其中 $\tilde{J}(W)$ 的每一个元素映射都是参数向量 W 的第 i 个元素成本向量. 为了构造和描述这样的紧凑表示 $\tilde{J}(W)$, 定义从空间 S 到有限集合 Q 的特征函数 f , 根据随机多阶段决策过程理论, 对每一个状态 $i \in S$, 存在多个特征 $f_1, f_2, \dots, f_K$, 共同构成状态 i 的特征向量 $F(i) = (f_1(i), \dots, f_K(i))$, 该特征向量表征了相关状态 i 的期望值. 因此, 对于基于特征压缩的紧凑表示方法, $\tilde{J}(W)$ 中的元素 $\tilde{J}_i(W)$ 可以表示为 $\tilde{J}_i(F(i), W)$, 则在基于特征压缩表示的近似动态规划方法中, 近似成本函数为

$$\tilde{J}_i(W) = g(F(i), W),$$

其中, g 被定义为一个近似框架 $\zeta^K \times \zeta^m \rightarrow \zeta (\zeta \in \zeta^n)$, 表示 g 紧紧覆盖了最显著状态空间 ζ^n . 这样, 就实现了大规模动态规划问题状态空间维度的降低, 并得到了系统参数相互作用和相互依赖的复杂度可扩展的优化框架.

综上, 上述理论与方法框架能够有效提高分布式储能系统的可靠性与设备寿命, 同时实现电池能量资源利用的优化, 从而解决分布式发电系统的波动性与随机性问题, 并为能源互联网的能量调度与管控提供基础.

3 分布式储能技术在数据中心的实践

数据中心建设首要考虑的要因素之一是数据中心所在位置的供能能力, 即数据中心系统是一个能量受限的系统, 同时其能耗与碳排放问题日益严重, 据统计, 截止到 2012 年, 全球数据中心的总量已达到 360 万个, 我国数据中心达到了 50 万个, 拥有服务器总量约 340 万台, 并以年复合增长率 14% 的速度持续增长. 同时, 数据中心的急速发展带来了严重的能耗问题, 从 2011 年到 2012 年, 全球数据中心能耗由 2100 亿千瓦时增加到了 3320 亿千瓦时, 增幅高达 63%. 与此同时, 这一趋势也导致数据中心碳排放呈几何倍增长 [26,27].

供能与能耗问题成为未来数据中心发展的核心问题. 从宏观的层面来看, 数据中心发展所面临的问题就是人类社会发展中能源问题的一个微观代表. 那么, 作为一种解决人类能源问题的方法论, 能源互联网思想为解决未来数据中心发展的核心问题提供了新的思路.

因此, 作者及其团队将基于能源互联网思想的分布式储能技术引入数据中心, 提出并实践了一套解决数据中心供能与能耗问题的方案. 能源互联网的核心思想之一, 就是由需求驱动能量的优化分配与共享. 所谓需求驱动, 其本质即为以能耗行为为依据, 运用能源互联网思想解决数据中心的能源问题, 首先要充分掌握数据中心的能耗构成. 传统数据中心的能耗构成中制冷设备占总能耗三分之一; 利用市电对服务器进行供电, 需要进行交、直流的多次转换, 这些损耗以热量形式散发造成了二次能耗损失, UPS 和服务器电源损耗约占总能耗的 50% [28].

因此, 本文将能源互联网的基础 — 分布式储能技术引入到数据中心的供能系统. 通过以基于锂电池的分布式储能代替传统 UPS, 能够减少交直流转换次数, 大幅度提高能源利用率与可靠性, 更重要的是, 将电池网络优化管理技术与数据中心相融合, 在数据中心中实现类似能源互联网的能量优化分

图 4 (网络版彩图) 引入分布式储能的数据中心能量优化架构

Figure 4 (Color online) Architecture of distributed energy storage embedded data center

配, 更有利于可再生能源的接入, 从而结合“节流”与“开源”的方式, 从多个层面上综合解决数据中心的供能与能耗问题。

引入分布式储能的数据中心的能量优化架构如图 4 所示, 分布式储能装备通过互联形成电池网络为服务器供电, 能量路由器则作为执行电池网络管理的实际载体, 根据电池状态、市电与可再生能源的能量输入状态、服务器及其他用电设施的负载状态控制市电、可再生能源的接入, 电池网络的充放电控制及拓扑结构的动态调整。

基于所提出的分布式储能系统中的电池管理理论与方法, 结合数据中心实际应用场景, 本应用还采用基于电池管理的数据中心能量优化管理方法, 具体内容如下:

首先, 通过将数据中心的储能系统, 服务器等设备形成的网络抽象为一个复杂网络系统, 根据网络中各节点的状态变量, 包括分布式储能电池荷电状态与充放电状态、服务器的负载状态、与 CPU 运行状态等参量, 基于非加性测度理论与电池网络模型, 通过定义控制在变量集上的集值函数定性描述系统变量间的相互依赖, 进而通过求解广义非线性 Choquet 积分, 导出定量测度控制变量间的非加性相互作用及其对数据中心系统整体性的影响, 并利用马尔可夫-蒙特卡罗 (Markov-Monte Carlo) 方法对 Choquet 积分求解方法进行求解, 导出低复杂度的数据中心系统量化特征动态提取算法, 实现对数据中心复杂网络动态系统行为的定量描述。

进一步, 基于数据中心复杂网络系统的特征量化, 运用复杂度可变的自适应动态规划算法对数据中心电池网络及服务器的能量行为进行动态优化。由于电池充放电、能量接入以及服务负载工作的时间尺度各不相同, 数据中心复杂网络呈多尺度动态异构特性, 必须采用复杂度可扩展的优化技术。因

图 5 (网络版彩图) 实际原型系统

Figure 5 (Color online) Prototype system

此, 我们基于非线性测度的动态特征提取方法和相应的自适应动态规划 (ADP) 算法, 通过对电池状态、能量接入状态、服务器负载等参量相互依赖度量和敏感性, 以及各参量与数据中心总体能耗的关系进行定量分析, 并针对数据中心状态参量的大规模数据量, 确定对应于不同参数子集的状态变量的重要性测度, 并根据每一参数子集的重要性和敏感性来做相应的参数选择以达到动态可控状态空间维度的目的, 降低优化问题规模, 最终通过动态规划得到数据中心的能量优化策略, 精确控制储能设备的充放电状态, 提高数据中心系统能量利用率, 降低能耗。

基于上述关键技术, 我们完成相关设备的研发, 包括分布式储能设备、分布式储能电池管理平台等系统设备的研发, 并应用于数据中心机架服务器的能量管控, 并进行了实际应用验证测试, 原型系统如图 5 所示。

4 结论

本文介绍了一套适用于分布式储能的大规模电池组或电池网络优化管理的方法, 包括:

- 单体和电池组或电池网络的建模与状态参数精确估算

在综合考虑电池使用过程中的非线性特性基础上, 提出了基于电路与通用数学模型的单体电池建模及 SOC 精准估算, 以及电池组或电池网络拓扑简化方法, 可实现高精度、低复杂度的 SOC 实时估算。

- 基于模糊测度的电池网络特征提取

这是电池网络特征量化建模是其优化管理的基础。本文将电池网络参量间的相互依赖描述为一个定义在控制变量幂集上的集值函数, 通过求解广义非线性 Choquet 积分, 定量测度控制变量间的非加

性相互作用及其对系统整体性的影响, 从而为定量地描述电池网络系统行为提供了一个有效的方法.

• 基于自适应动态规划的电池网络优化管理方法

针对电池网络优化管理这一多尺度的动态网络优化问题, 本文提出了一种自适应动态规划算法, 通过对相互依赖度量和敏感性进行定量分析, 确定对应于不同参数子集的状态变量的重要性测度, 并根据每一参数子集的重要性和敏感性来做相应的参数选择以达到降低电池网络优化状态空间维度的目的, 从而大大降低电池网络优化管理策略的计算复杂度, 可实现实时执行.

最后, 介绍了如何将基于能源互联网思想的分布式储能架构及其管理优化方法与技术引入与人类生存空间同样存在能量受限问题的数据中心, 并给出了在数据中心中实际应用系统的介绍. 本文工作可以为能源互联网的重要基础分布式储能技术的研究与应用提供方法指导与技术支撑.

参考文献

- 1 Rifkin J. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World. New York: Palgrave Macmillan, 2013
- 2 Geng B, Mills J K, Sun D. Energy management control of microturbine-powered plug-in hybrid electric vehicles using the telemetry equivalent consumption minimization strategy. *IEEE Trans Veh Technol*, 2011, 60: 4238–4248
- 3 Benda M. Shaping the internet: the dynamics. *IEEE Internet Comput*, 1998, 2: 87–90
- 4 Lynch C A. Networked information resource discovery: an overview of current issues. *IEEE Sel Area Comm*, 1995, 13: 1505–1522
- 5 Huse R A. Research and development: breaking the crisis: options cover primary energy resource recovery, fuel conditioning, conversion, improved transmission, and storage. *IEEE Spectrum*, 1974, 11: 40–47
- 6 Boyd J. An internet-inspired electricity grid. *IEEE Spectrum*, 2013, 50: 12–14
- 7 Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *P IEEE*, 2011, 99: 133–148
- 8 Rifkin J. The third industrial revolution. *Eng Technol*, 2008, 3: 26–27
- 9 Appellrath H J, Terzidis O, Weinhardt C. Internet of energy. *Bus Inform Syst Eng*, 2012, 4: 1–2
- 10 Bui N, Castellani A P, Casari P, et al. The internet of energy: a web-enabled smart grid system. *IEEE Network*, 2012, 26: 39–45
- 11 Soh Y S, Quek T Q S, Kountouris M, et al. Energy efficient heterogeneous cellular networks. *IEEE Sel Area Comm*, 2013, 31: 840–850
- 12 Carrasco J M, Franquelo L G, Bialasiewicz J T, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey. *IEEE Trans Ind Electron*, 2006, 53: 1002–1016
- 13 De Rijcke S, Ergun H, Van Hertem D, et al. Grid impact of voltage control and reactive power support by wind turbines equipped with direct-drive synchronous machines. *IEEE Trans Sust Energy*, 2012, 3: 890–898
- 14 Berdichevsky G, Kelty K, Straubel J B, et al. The tesla roadster battery system. Tesla Motors Inc, 2006, 1–5
- 15 Mohamed Y A R I. Mitigation of dynamic, unbalanced, and harmonic voltage disturbances using grid-connected inverters with filter. *IEEE Trans Ind Electron*, 2011, 58: 3914–3924
- 16 Schaltz E, Khaligh A, Rasmussen P O. Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle. *IEEE Trans Veh Technol*, 2009, 58: 3882–3891
- 17 Szumanowski A, Chang Y. Battery management system based on battery nonlinear dynamics modeling. *IEEE Trans Veh Technol*, 2008, 57: 1425–1432
- 18 Ye C, Yung N H C, Wang D. A fuzzy controller with supervised learning assisted reinforcement learning algorithm for obstacle avoidance. *IEEE Trans Syst Man Cy B*, 2003, 33: 17–27
- 19 Zhang S K, Wang H B, Yang J, et al. GPS short-delay multipath estimation and mitigation based on least square method. *J Syst Eng Electron*, 2009, 20: 954–961
- 20 Chon K H, Cohen R J. Linear and nonlinear ARMA model parameter estimation using an artificial neural network. *IEEE Trans Biomed Eng*, 1997, 44: 168–174

- 21 Aidala V J. Parameter estimation via the Kalman filter. *IEEE Trans Automat Contr*, 1977, 22: 471–472
- 22 Zhang J, Ci S, Sharif H, et al. Modeling discharge behavior of multicell battery. *IEEE Trans Energy Conver*, 2010, 25: 1133–1141
- 23 Gilboa I, Schmeidler D. Additive representations of non-additive measures and the Choquet integral. *Ann Oper Res*, 1994, 52: 43–65
- 24 Wu D, Ci S, Luo H, et al. A theoretical framework for interaction measure and sensitivity analysis in cross-layer design. *ACM Trans Model Comput S*, 2010, 21: 1–6
- 25 Wang F Y, Zhang H, Liu D. Adaptive dynamic programming: an introduction. *IEEE Comput Intell M*, 2009, 4: 39–47
- 26 Zakarya M, Rahman I U, Khan A A. Energy crisis, global warming & IT industry: can the IT professionals make it better some day? A review. In: *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Emerging Technologies*, Islamabad, 2012. 1–6
- 27 Rao L, Liu X, Xie L, et al. Coordinated energy cost management of distributed internet data centers in smart grid. *IEEE Trans Smart Grid*, 2012, 3: 50–58
- 28 Curtis P M. *UPS Systems: Applications and Maintenance with an Overview of Green Technologies. Maintaining Mission Critical Systems in a 24/7 Environment*. 2nd ed. Manhattan: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 223–264

The cornerstone of energy internet: research and practice of distributed energy storage technology

CI Song^{1,2*}, LI HongJia^{1*}, CHEN Xin¹ & WANG QiangWen³

1 *High Performance Network Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2 *University of Nebraska-Lincoln, NE 68182, USA;*

3 *Nova GreenTech Inc., NE 68130, USA*

*E-mail: sci@energyinternet.org, lihj@hpn.ac.cn

Abstract Due to the distribution and the fluctuation of energy generation, and random energy demands, energy flows in energy internet have inherent uncertainties and randomness. Therefore, distributed energy storage system is the fundamental component of energy internet, which can effectively smooth uncertainty of energy flow, and support spatial-temporal reallocation of originally distributed and fluctuant energy. Battery, as one of the most important energy storage carrier, has many non-linear physical effects, e.g., self-recovery effect, rate capacity effect, and individual physical differences among different cells. Therefore, effective battery network management determines whether distributed battery storage system could work well. However, from viewpoint of battery management, battery network, which contains many inter-dependent and non-linearly featured elements, is a complex system, which brings great challenges to battery network management. Therefore, based on our previous technical achievements, we propose a set of methods and techniques on battery network management: 1) modeling and state parameters estimation of battery network; 2) fuzzy measure based features extraction and fast calculation of battery network; 3) adaptive dynamic programming based battery network optimization. Finally, inspired by the core idea of energy internet, we introduce the distributed energy storage architecture, and its optimal management methods to the energy supply and backup system of data centers, and describe our developed prototype system. Our work could provide theoretical and technical guidelines to applications of energy internet and distributed energy storage system.

Keywords energy internet, distributed energy storage, complex system, battery management, data center

CI Song was born in 1970. He received his Ph.D. degree from the University of Nebraska-Lincoln in 2002. Prof. Ci is with the High Performance Network Laboratory at Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, China, and the Ubiquitous Computing Lab, University of Nebraska-Lincoln, USA. His research interests include dynamic complex system modeling and optimization, distributed energy storage engineering, and computer networking and communications. Prof. CI Song is a senior member of IEEE and a member of ACM. He also serves as the chief scientist of the National Strategic Research Group of Chinese Energy Internet, sponsored by National Energy Administration of China.

management in communications systems.

CHEN Xin was born in 1986. He received the Ph.D. degree in the communication and information systems from Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, in 2013. Currently, he is a PostDoc. in Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing. His current research interests include resource allocation in wireless communications and energy

is a member of IEEE technical committee on green communications.

LI HongJia was born in 1981. He received the Ph.D. degree from the Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing in 2011. Currently, he is an assistant professor at Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include green communications and computing, wireless networking, radio resource management, and complex system modeling and optimization. Dr. Li

WANG QiangWen was born in 1971. He received his Master degree from University of Washington, Seattle, Washington state, USA in 2000. Currently, he is president of Nova GreenTech Inc. His research interests include distributed energy storage, battery management, battery modeling, high speed communication, and chip design and verification methodology.