考虑规模化储能的配电网电压分布式控制

王 泉¹,何怡刚¹,马恒瑞²,刘小燕¹,张 慧¹,高文忠³
(1. 武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072;
2. 青海大学 新能源光伏产业研究中心,青海 西宁 810016;
3. 丹佛大学 电气与计算机工程系,美国 丹佛 80208)

摘要:为了实现储能资源的规模化利用,构建了面向大规模储能设备的协同控制框架,提出了一种基于分布 式优化方法的配电网电压控制方法。该方法利用改进型交替方向乘子算法,在优化模型的对偶问题中引入 一致性人工约束,仅依靠相邻设备间的通信,即可实现完全分布式的储能设备充放电管理与配电网电压支 撑。基于IEEE 33节点系统的仿真算例验证了所提方法的有效性,仿真结果表明利用分布式协同控制能够 快速收敛到优化问题的最优解,有利于平抑可再生能源出力波动对电网的影响,确保了电网电压的安全稳 定,体现出较好的扩展能力与应用水平。

关键词:规模化储能;交替方向乘子法;配电网;电压控制;分布式控制

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202111012

0 引言

中图分类号:TM 714.2

加快储能有效融入电力系统发、输、用各环节, 对于保障电力可靠供应与新能源高效利用进而实 现"双碳"目标具有重要意义[1]。传统集中式储能受 地理条件等因素的限制,装机容量增速呈逐年下降 趋势;相比之下,需求侧分布式储能技术正得到迅速 发展。近年来,信息通信技术的应用赋予分布式储 能自主参与电网调控的能力,通过微电网、虚拟电 厂、主动配电网等方式实现有效的潮流管理,就地解 决系统中局部电压支撑等问题[2-3]。分布式储能是 需求响应的重要功率来源,具有容量小、数量规模 大、灵活性高、响应速度快等特点。那么,如何协调 这些覆盖辽阔地理区域的多元化储能设备,为电力 系统提供快速、有效的局部电压支撑,是规模化储能 资源利用所要解决的重要问题。因此,有必要开展 基于规模化储能的配电网电压分布式控制研究,从 而达到快速平抑可再生能源出力对电网电压影响的 目的。

配电网的电压调节可以采用集中式的控制结构,由控制中心调度区域内所有的分布式储能设备。 考虑到未来电网中将存在大量可用的储能资源,集 中式控制需实时感知设备与电网状态并下发控制指 令,控制中心的数据吞吐量大、计算负担重,导致通 信成本过于高昂,因而无法有效提高风、光等可再生

收稿日期:2021-06-30;修回日期:2021-09-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB0905905);武汉 市科技计划项目(20201G01)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2020YFB0905905) and Wuhan Science and Technology Plan(20201G01) 能源的消纳水平。采用相邻通信原则的分布式控制 具有抗干扰性强、扩展性好、即插即用和保护隐私等 优点^[4],更适合当前背景下分布式储能系统的协调 调度,也符合电力系统去中心化的总体趋势。在分 布式控制结构中,由信息网互联的储能设备可视为 具有决策能力的智能体,多智能体间通过相互配合 以实现协同控制的目的^[4]。

常见的分布式电压控制方法有一致性控制和分 布式优化2种。一致性控制方法是多智能体网络的 主要控制手段,被广泛应用于孤网状态下的微电网 控制,可直接同步分布式电源节点上的电压^[5]。在 一般的大电网系统中,更多的研究采用主从一致性 方法,令分布式发电设备集群具有主动参与电力系 统调控的能力,如文献[6]中的多智能体领导者采用 简单的比例积分(PI)控制调整一致性平衡点,但只 可用于电网关键节点的电压调节。相比于单纯实现 储能设备间的一致性,系统运营商或储能设备提供 商更希望优化配置其管理下的储能资源,在满足电 网服务要求的基础上降低设备使用成本,使收益最 大化。虽然一致性控制可以通过增量成本一致性, 达到类似经济调度的效果^[7],但针对实际物理设备 的运行极限,此类方法只能靠限幅环节加以约束。

分布式优化方法为解决规模化储能的优化调度 问题提供了统一框架,优化模型的目标函数与储能 的使用成本及回报有关,设备及电网的运行限制可 在约束条件中体现。分布式优化方法将集中式优化 模型分配给各智能体协同解决,能够实现储能资 源的快速优化配置,但难点是如何获得具有较好收 敛性的分布式求解算法。大量现有研究将分布式优 化方法应用于电力系统的电压调节,如采用交替方 向乘子算法 ADMM(Alternating Direction Method of Multipliers)、对偶分解法等^[8-10];文献[11]提出了基 于梯度投影法的分布式电压控制方法,在优化问题 的求解中利用与电网结构相关的正定矩阵调整变量 迭代方向,在保持目标函数下降的同时得到了完全 分散式的控制率;基于相同的思路,文献[10]采用的 对偶下降法收敛速度更快,但要求输电线路具有均 一的阻抗比以及设备间的两跳相邻通信。相较于上 述文献采用的一阶优化方法,ADMM在实际应用中 体现出了更好的收敛性与鲁棒性[12]。文献[13]给出 了基于 ADMM 的配电网电压控制方法, 与文献 [14] 采用的分布式电压控制相似,信息网中每个智能体 自身优化问题中需包含相邻节点的耦合变量,通过 一致性约束解决了经典 ADMM 中要求中央协调单 元的缺点,但这类方法增加了各节点决策变量数,加 重了计算及通信负担,更适合微电网群或区域电力 系统间的协调调度,且难以应对优化模型中的强耦 合约束。文献[2]给出了一种无需迭代求解的分布 式电压控制,节点电压估算需沿着配电网辐射方向 序贯进行,因而难以适用于节点数较多的电网系统。

基于上述分布式电压控制方法的适用场景及规 模化储能的运行特点,本文提出了一种面向规模化 储能的电网电压完全分布式控制策略。首先,针对 本文研究问题建立优化模型,在模型预测控制 MPC (Model Predictive Control)框架内构建了问题的数 学描述:然后,基于改进型ADMM^[15],利用优化模型 的对偶一致性转换,实现了优化模型的完全分布式 求解;最后,通过仿真算例验证了所提方法的有效性 与适用性,当储能设备数量显著增加时,能够在有限 的时间内给出最优的储能功率设定,在超大规模储 能系统的开发利用中体现出了更好的扩展能力。

1 电压控制模型

本节建立了以配电网潮流方程为基础的储能电 压支撑问题数学描述,为后续分布式求解算法提供 模型基础。

1.1 配电网潮流模型

配电网的拓扑结构可通过图论模型构建,图论 模型为 $G=(\mathcal{N}, \mathcal{E})$,其中G为有向图, \mathcal{N} 为配电网中所 有节点的集合(除公共连接点外), N中的元素个数 为N.E为输电线路集合。典型的配电网一般具有辐 射状结构,可用线性的DistFlow模型描述线路潮流 与节点电压之间的关系[11],即:

$$P_{ij} - \sum_{l \in \mathcal{N}_j} P_{jl} = P_j^{\text{RES}} + P_j^{\text{b}} - P_j^{\text{L}}$$
(1)

$$Q_{ij} - \sum_{l \in \mathcal{N}} Q_{jl} = -Q_j^{\mathrm{L}}$$
(2)

$$V_{i} - V_{j} = r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}$$
(3)

式中: $i, j \in \mathcal{N}$; $(i, j) \in \mathcal{E}$; \mathcal{N}_i 为节点j的相邻节点集合; 式中: $h \mid t$ 表示当前时刻t对未来h步的预测,h =

 P_{i}^{RES} 、 P_{i}^{b} 和 P_{i}^{L} 分别为可再生能源系统、储能和不可控 负荷的功率注入;P_{ii}、P_i为线路有功潮流;Q_{ii}、Q_i为线 路无功潮流; Q¹为负荷无功; V_i、V_i为节点电压; r_{ii}、x_{ii} 分别为线路电阻与电抗。式(1)为配电网节点的有 功平衡方程,式(2)为配电网节点的无功平衡方程。

式(1)--(3)可用向量形式表示为:

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{P}^{n} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{Q}^{n} + \boldsymbol{V}_{0} \tag{4}$$

式中:V为N中节点的电压组成的列向量, $V \in \mathbb{R}^{N}$: P^{n} 、 Q^{n} 分别为由各节点有功、无功注入组成的列 向量, $P^{n} \in \mathbb{R}^{N}$, $Q^{n} \in \mathbb{R}^{N}$; $V_{0} = I_{N}v_{0}$, v_{0} 为配电网公共连接 点处的电压, I_N 表示长度为N、所有元素为1的列向 量; R、X分别为电网的电阻、电抗矩阵, $R \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $X \in \mathbb{R}^{N \times N}$,可由式(5)得到^[11]。

 $R = (M^{-1})^{\mathrm{T}} D_{\mathrm{r}} M^{-1}, X = (M^{-1})^{\mathrm{T}} D_{\mathrm{r}} M^{-1}$ (5)式中:M为G的关联矩阵: D_{Λ} 分别为 \mathcal{E} 中所有线 路电阻、电抗组成的对角矩阵。R、X可视为配电网 节点电压与注入功率的敏感度矩阵,一般不具有稀 疏性结构。

1.2 考虑配电网电压支撑的优化问题建模

基于优化的控制方法能够系统解决电网的电压 控制问题,使电网与分布式储能设备的运行约束得 到满足。考虑到一般中低压配电网较高的阻抗比, 系统的有功潮流对电压的影响更为明显^[10],因此本 文仅考虑储能系统的有功控制,但本文所提出的控 制框架可推广到同时考虑储能有功、无功支持的情 况。单一储能设备的充、放电通过底层的换流器控 制实现,在本文考虑的时间尺度下,可忽略换流器控 制回路的暂态过程。考虑到储能系统模型的时间耦 合特性,本文基于MPC框架,针对未来一段时间范 围H构建优化模型。

假设配电网每个节点都连接有一个储能设备, 对于 $i \in \mathcal{N}$,在任意时刻有:

$$\min_{\substack{P_{i,k|l}^{\mathrm{b,c}}, P_{i,k|l}^{\mathrm{b,d}}} \sum_{h=0}^{H-1} \sum_{i \in \mathcal{N}} \left\{ \left[a_i (P_{i,h|l}^{\mathrm{b,c}})^2 + a_i (P_{i,h|l}^{\mathrm{b,d}})^2 \right] + b_i \left(P_{i,h|l}^{\mathrm{b,c}} + P_{i,h|l}^{\mathrm{b,d}} \right) \right\}$$
(6)

$$0 \leq P_{i,h|\iota}^{\mathrm{b,\,c}}, P_{i,h|\iota}^{\mathrm{b,\,d}} \leq P_i^{\mathrm{b,\,max}}$$

$$(7)$$

$$E_{i,h+1|t}^{\mathrm{b}} = E_{i,h|t}^{\mathrm{b}} + \eta_{i}^{\mathrm{c}} P_{i,h|t}^{\mathrm{b,c}} \Delta t - \frac{P_{i,h|t}^{\mathrm{b,d}} \Delta t}{\eta_{i}^{\mathrm{d}}}$$
(8)

$$E_{i,0|t}^{\rm b} = E_i^{\rm b0} \tag{9}$$

$$0.2E_{i}^{b,\max} \leq E_{i,h|t}^{b} \leq 0.8E_{i}^{b,\max}$$
(10)

$$P_{ij,h|t} - \sum_{l \in \mathcal{N}_{i}} P_{jl,h|t} = P_{j,h|t}^{\text{RES}} + P_{j,h|t}^{\text{b}} - P_{j,h|t}^{\text{L}}$$
(11)

$$Q_{ij,h|t} - \sum_{l \in \mathcal{N}_{j}} Q_{jl,h|t} = -Q_{j,h|t}^{L}$$
(12)

$$V_{i,h|t} - V_{j,h|t} = r_{ij} P_{ij,h|t} + x_{ij} Q_{ij,h|t}$$
(13)

$$V^{\min} \leqslant V_{i,h|i} \leqslant V^{\max} \tag{14}$$

0,1,…,H-1; $P_{i,h|\iota}^{b,c}$, $P_{i,h|\iota}^{b,d}$ 分别为储能的充、放电功率, 是优化模型的决策变量; $a_i \ b_i$ 为储能运行成本参数; $P_i^{b,\max}$ 为储能允许的最大功率; $E_{i,h|\iota}^{b}$ 为储能能量; η_i^{c} 、 η_i^{d} 分别为充、放电效率; Δt 为控制周期长度; $E_{i,0|\iota}^{b}$ 为 当前时刻储能的初始能量; E_i^{b0} 为当前储能能量的测 量值; $E_i^{b,\max}$ 为储能的能量容量; V^{\min} 、 V^{\max} 分别为允许 的配电网节点最小、最大电压幅值。

目标函数式(6)表示储能设备的使用成本,由 二次型表示;需要注意的是,目标函数中显式地对 P^{h,e}_{*i*,*h*|}, P^{h,d}进行惩罚,避免了非线性互补约束 P^{h,e}_{*i*,*h*|}, P^{h,d}=0的引入,确保了任意时刻储能只工作于 充电或者放电状态^[16]。针对优化模型的约束条件, 式(7)表示储能的额定功率限制;式(8)给出了储能 系统模型;式(9)表示当前时刻储能的初始能量由系 统反馈得到;式(10)表示将储能的能量范围限制在 20%~80%的荷电状态(SOC)值,防止因深度充放电 对设备使用寿命造成影响;式(11)—(13)表示预测 时域范围内的配电网潮流模型,可根据式(1)—(3) 得到;式(14)表示配电网允许的电压范围。

2 基于对偶一致性 ADMM 的优化问题快速 分布式求解

分布式优化方法一般利用优化模型设计的稀疏 性特点,在问题迭代求解的过程中寻求解的分布式 计算。相比于一般的一阶分布式优化方法,ADMM 采用问题的增广Lagrangian函数,在大规模优化问 题求解中体现出更快的收敛速度^[12]。针对上述得到 的MPC优化模型(式(6)—(14)),首先得到优化模 型的标准形式;然后基于原始问题的对偶形式转换, 利用一致性ADMM实现优化问题的完全分布式求 解。图1给出了实现分布式求解过程中,优化模型 间的转换关系。



图1 优化模型间的转换关系

Fig.1 Transformation relation among optimization models

2.1 优化模型的标准形式

分析优化模型中的耦合与非耦合约束条件,将 其表示为如下标准形式(式(15)为目标函数,式(16) 为耦合约束),以方便后续的分布式求解。

$$\min \sum_{i \in \mathcal{N}} \left(\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Omega}_i \boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{\beta}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i \right) \quad \boldsymbol{x}_i \in \boldsymbol{X}_i, i \in \mathcal{N}$$
(15)

$$\sum \left[\boldsymbol{A}_{i} \left(\boldsymbol{E} \boldsymbol{x}_{i} \right)^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{b}_{i} \right] \leq 0 \qquad (16)$$

$$\boldsymbol{b}_{i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{i} (\boldsymbol{P}_{i}^{\text{RES}} - \boldsymbol{P}_{i}^{\text{L}})^{\text{T}} - \boldsymbol{X}_{i} (\boldsymbol{Q}_{i}^{\text{L}})^{\text{T}} + (\boldsymbol{v}_{0} - \boldsymbol{V}^{\text{max}}) \boldsymbol{I}_{i} \boldsymbol{I}_{H}^{\text{T}} \\ - \boldsymbol{R}_{i} (\boldsymbol{P}_{i}^{\text{RES}} - \boldsymbol{P}_{i}^{\text{L}})^{\text{T}} + \boldsymbol{X}_{i} (\boldsymbol{Q}_{i}^{\text{L}})^{\text{T}} + (\boldsymbol{V}^{\text{min}} - \boldsymbol{v}_{0}) \boldsymbol{I}_{i} \boldsymbol{I}_{H}^{\text{T}} \end{bmatrix}$$

式中: $\mathbf{x}_i = \left[P_{i,0|i}^{\text{h.e.}}, \cdots, P_{i,H-1|i}^{\text{h.e.}}, P_{i,0|i}^{\text{h.d.}}, \cdots, P_{i,H-1|i}^{\text{h.d.}} \right]^{\text{T}}$ 为优化模型的决策变量; \mathbf{X}_i 为决策变量的可行域,由可拆分的约束条件(式(7)—(10))给出; Ω_i 、 β_i 可由式(6)中的 a_i 、 b_i 得到; $\mathbf{A}_i = \left[\mathbf{R}_i^{\text{T}}, -\mathbf{R}_i^{\text{T}} \right]^{\text{T}}$,可视为所有节点电压对节点i注入功率变化的敏感度,在结构更为一般的电网系统中可由常规方法获得, \mathbf{R}_i 为配电网电阻矩阵 \mathbf{R} 的第i列; $\mathbf{E} = \left[-I_H, I_H \right], I_H$ 表示元素均为1的H维列向量; $\mathbf{P}_i^{\text{RES}}$ 、 \mathbf{P}_i^{L} 、 \mathbf{Q}_i^{L} 分别为时间范围H内可再生能源与负荷有功、无功功率预测轨迹堆叠成的列向量, I_i 为第i个元素为1、其余元素为0的N维列向量。

2.2 基于对偶一致性 ADMM 的优化模型求解

针对优化模型标准形式(式(15)、(16))开展分 布式求解方法研究,经典ADMM一般需采用中央协 调单元单独构建优化问题处理耦合约束(式(16)), 因而无法实现完全分布式的优化模型求解。考虑到 中央协调单元可能具有与原始优化问题相似的变量 规模,算法迭代时间将大量消耗于此,因此其计算复 杂度将随着设备数量增加而显著提高,表现为扩展 性上的不足,难以应对大规模的优化问题求解[17]。 为了克服传统 ADMM 的不足, 文献 [18] 首次提出考 虑一致性约束的改进 ADMM,实现了弱耦合约束优 化问题的分布式求解;文献[19]进一步将该方法推 广到优化模型中包含全局等式约束的情况,即强耦 合约束条件中包含问题的整个决策变量空间;针对 具有全局不等式约束的优化问题,文献[15]提出一 种分布式求解方法,可更好地解决本文考虑的分布 式电压控制问题。

首先,将约束条件(式(16))表示为等式约束的 形式,具体如下:

$$\sum_{i=\mathcal{N}} \left[\boldsymbol{A}_i (\boldsymbol{E}\boldsymbol{x}_i)^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{b}_i \right] = \boldsymbol{w}$$
(17)

式中: $w \in \mathbb{R}^{2N \times H}$, $\mathbb{R}^{2N \times H}$ 表示非正象限, $I_{\mathbb{R}^{2N \times H}}$ 为该象限的指示函数, 即当w位于该象限内时, $I_{\mathbb{R}^{2N \times H}}(w) = 0$, 否则为正无穷。

接着,结合式(17)给出优化模型标准形式的Lagrangian函数,具体如下:

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{y}) = \sum_{i \in \mathcal{N}} f_i(\boldsymbol{x}_i) + \boldsymbol{I}_{\mathbf{R}^{2N \times H}_{-}}(\boldsymbol{w}) + \operatorname{trace}\left\{\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} \sum_{i \in \mathcal{N}} (\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{E}\boldsymbol{x}_i)^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{b}_i - \boldsymbol{w}/N)\right\}$$
(18)

式中: $f_i(\mathbf{x}_i)$ 表示原始问题的目标函数(式(15));

 $y \in \mathbf{R}^{2N \times H}$,为耦合约束(式(16))的对偶变量;trace{·} 表示矩阵的迹。

然后,根据式(18)的Lagrangian函数得到如下 对偶函数:

$$g(\mathbf{y}) = \min_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{X}_i, i \in \mathcal{N}, \atop \mathbf{w}} \sum_{i \in \mathcal{N}} \mathcal{L}(\mathbf{x}_i, \mathbf{w}, \mathbf{y})$$
(19)

由此得到原优化模型(式(15)、(16))的对偶问题如下:

$$\max_{\mathbf{y}} g(\mathbf{y}) = \max_{\mathbf{y}} \sum_{i \in \mathcal{N}} g_i(\mathbf{y})$$
(20)

根据式(19)的表达形式可知,对偶问题(式 (20))具有可拆分的目标函数。假设对偶间隙为0, 可通过求解对偶问题还原原始问题的最优解。

为了实现对偶问题的分布式求解,考虑网络中各节点目标函数 $g_i(y_i)$,以对偶变量y的本地副本 $y_i \in \mathbf{R}^{2N \times H}$ 为决策变量,引入一致性约束条件使其收敛到相同值,即得到对偶问题(式(20))的可分布式求解形式如下:

$$\max_{\mathbf{y}_i} \sum_{i \in \mathcal{N}} g_i(\mathbf{y}_i) \tag{21}$$

$$\boldsymbol{y}_i = \boldsymbol{\theta}_{ij} = \boldsymbol{y}_j \quad i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}_i$$
(22)

式中:**θ**_{ij}为引入的辅助变量。式(22)为对偶变量的 一致性约束。

最后,采用 ADMM 对优化模型(式(21)、(22)) 求解,详细的推导与收敛性证明可参见文献[15],这 里直接给出算法的迭代步骤。算法的第 k 步迭代 中,有:

$$\boldsymbol{p}_{i}^{k+1} = \boldsymbol{p}_{i}^{k} + \rho \sum_{j \in \mathcal{N}_{i}} (\boldsymbol{y}_{i}^{k} - \boldsymbol{y}_{j}^{k})$$
(23)

$$\boldsymbol{r}_{i}^{k+1} = \boldsymbol{\rho} \sum_{j \in \mathcal{N}_{i}} (\boldsymbol{y}_{i}^{k} + \boldsymbol{y}_{j}^{k}) - (\boldsymbol{p}_{i}^{k+1} - \boldsymbol{b}_{i})$$
(24)

 $(\boldsymbol{x}_{i}^{k+1}, \boldsymbol{t}_{i}^{k+1}) =$

$$\underset{\substack{\mathbf{x}_{i}\in\mathbf{X}_{i}\\\mathbf{t}_{i}\in\mathbf{R}_{*}^{2N\times H}}{\operatorname{space{1.5}}}\left\{f_{i}(\mathbf{x}_{i})+\frac{1}{4\rho d_{i}}\left\|\boldsymbol{A}_{i}(\boldsymbol{E}\boldsymbol{x}_{i})^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{r}_{i}^{k+1}-\boldsymbol{t}_{i}\right\|_{\mathrm{F}}^{2}\right\} (25)$$

$$\boldsymbol{y}_{i}^{k+1} = \frac{1}{2\rho d_{i}} \boldsymbol{\Pi}_{\boldsymbol{R}_{+}^{2N \times H}} \Big[\boldsymbol{A}_{i} (\boldsymbol{E}\boldsymbol{x}_{i}^{k+1})^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{r}_{i}^{k+1} \Big]$$
(26)

式中: $i \in \mathcal{N}$; ρ 为给定常数; d_i 为 \mathcal{N}_i 中元素的个数; $\|\cdot\|_{F}$ 为矩阵的Frobenius范数; $\Pi_{\mathbf{R}^{2N\times H}_{+}}$ 表示向非负象限的投影; $p_i^k, \mathbf{r}_i^k, \mathbf{t}_i^k$ 为算法的状态变量; \mathbf{x}_i^k 为原始变量。

从式(23)—(26)可以看出,各分布式储能仅需 获得相邻节点的y^{*}值,各控制器的计算平行进行,无 需中央协调单元,即可解决储能系统的分布式电压 控制问题。图2针对每个储能设备给出了控制策略 流程图,图中K_{max}为最大迭代次数。

3 仿真算例

为了验证所提算法在实现大规模储能设备协同 调压中的有效性,本文基于 IEEE 33 节点系统^[20]对



图2 储能分布式电压控制策略流程图

Fig.2 Flowchart of distributed voltage control for energy storage devices

调压效果进行了分析,比较了集中式优化方法与分 布式优化方法的控制效果,讨论了所提方法的扩展 能力。

附录 A 图 A1 给出了分布式控制结构下储能 设备与配电网示意图,其中聚合商可视为一系列储 能设备的领导者,其职责是接收电力系统运营商的 服务控制请求,并分配所获收益。电力系统、储能设 备及其分布式控制系统组成了物理信息网络。 IEEE 33节点系统参数可由文献[20]获得。

3.1 仿真设置

储能设备的额定参数(额定功率、额定能量、充 电效率、成本系数)在给定的范围内随机产生,其参 数范围如附录A表A1所示,所有储能设备的初始 SOC值设为50%,充、放电效率取值相同。储能设备 的通信网络可完全独立于配电网结构,这里仅要求 网络图论模型的无向性与连通性^[15];因此,假定分布 式储能具有环状的通信网络结构,对于储能设备{1, 2,…,N},其在配电网中的接入节点随机选择,每个 储能设备包含5个相邻的储能设备,忽略通信延时。 仿真实验中,在配电网随机接入了11个光伏发电系 统,24 h内的光伏发电情况见附录A图A2(a),采样 周期为5 min,该数据可由文献[21]获得。

此外,仿真中随机选择了10个功率消耗随时间 变化的有功负荷,其数据可由文献[22]获得,负荷的 功率变化情况见附录A图A2(b),负荷功率基准为 IEEE 33节点系统的原始运行点。配电网允许的电 压范围设为0.95~1.02 p.u.,配电网公共连接点处的 电压设为1 p.u.。对于本文所采用的分布式优化算 法,ρ设为0.01,算法循环的退出条件为:

$$\frac{\left|f_{obj}^{k}-f_{obj}^{*}\right|}{f_{obj}^{*}} \leq \varepsilon_{1}, \frac{\max_{i\in\mathcal{N}}\left\|\boldsymbol{y}_{i}^{k}-\bar{\boldsymbol{y}}^{k}\right\|_{F}}{\left\|\bar{\boldsymbol{y}}_{i}^{k}\right\|_{F}} \leq \varepsilon_{2} \qquad (27)$$

式中: f_{obj}^{k} 为第k步的目标函数值; f_{obj}^{*} 为集中优化给出的最优目标函数值; $\bar{y} = \sum_{i \in \mathcal{N}} y_{i}/N$; K_{max} 设为500;阈值设为 $\varepsilon_{1} = 0.05, \varepsilon_{2} = 0.1, 分别表示目标函数收敛性与对偶变量收敛性。$

仿真实验中的优化问题采用 YALMIP 调用优化 程序 CPLEX 求解, 仿真步长与 Δt 均设为5 min, 仿真 总时长为24 h, MPC 的预测时长 H 设为1 h。本文使 用一台 Core i5 16 GB 的计算机, 采用 MatPower 对系 统进行仿真。

附录A图A3给出了无储能支撑下配电网不同 节点的电压变化情况。可以看出,无储能电压支撑 下,系统部分节点电压位于允许范围之外,在接近中 午时光伏出力处于较高水平,电网电压升高明显。

3.2 算例1:IEEE 33节点系统调压效果分析

在该仿真算例中,基于对偶一致性 ADMM 的分 布式调压效果见附录 A 图 A4,所有分布式储能设备 的充、放电功率与 SOC 情况见附录 A 图 A5。可以看 出:储能设备大部分时间工作于放电状态,支撑配电 网电压使其位于 0.95 p.u.以上;在光伏系统出力明 显升高时(10:00—15:00),储能系统工作在充电状 态,保证部分节点电压不超过 1.02 p.u.的上限,且未 发生储能充、放电功率同时非零的情况。图 3 比较 了优化模型在集中式优化与分布式优化下的目标函 数值。综上可见,本文采用的分布式电压控制能够 得到与集中式优化相似的储能运行成本与电压支撑 效果,即收敛到问题的全局最优。





3.3 算例2:协同大规模储能的算法扩展性分析

为了进一步验证分布式优化在协同大规模储能 设备时的优良特性,本算例比较了不同储能设备数 量情况下,集中式优化与分布式优化的计算时间。 对系统32个节点,增加每个节点接入储能设备的数 量,用 N_{sc} 表示。在仿真分析中,调整了通信网络中 每个储能设备相邻节点的数量,以加快算法收敛。 针对不同的储能设备数量,设每台设备的相邻节点 数为 $5N_{sc}$, ρ 的值调节为 ρ_0/N_{sc} ,其中 ρ_0 为 N_{sc} =1时 ρ 的取值。针对式(27)中的目标函数和对偶变量收敛 性判断条件,图4给出了 N_{sc} 分别取为1、5、10、50(对 应的储能设备总数分别为32、160、320、1600)时,一 个控制周期内对偶一致性ADMM的收敛速度,可见 算法能够在适当的循环次数(145次)达到给定的迭 代终止条件,说明分布式优化可以通过优化通信网 络结构设计来实现有限迭代次数后收敛^[23]。



图4 不同 N_{sc}下对偶一致性 ADMM 的收敛性与 计算时间比较

Fig.4 Convergence and computation time with dual consensus ADMM under different N_{sc} values

表1列出了集中式优化与分布式优化1次迭代 所用时间,分布式优化方法每次迭代的计算时间对 问题规模敏感性不高,当系统中每增加1个储能设 备,也对应增加了1个分布式的控制器。从图4可以 看出,集中式优化的计算时间随储能设备数量的增 加而显著提高,而分布式优化的计算时间随储能设 备数量的增加变化不大。这是因为分布式优化框架 下,每个储能设备决策变量的长度只与预测时长有 关。综合图4和表1的结果可知,分布式优化的计算 时间对协同储能设备数量变化的敏感度不高,在储 能设备数量较少的情况下,分布式优化的选代计算 导致其所需时间更长,此时集中式优化的计算时间 更短,但是随着储能设备数量的增加,集中式优化的 计算时间显著提高,而分布式优化的计算时间变化 不明显。这表明了分布式优化在协调超大规模分布

表1 集中式优化与分布式优化计算时间比较

Table 1 Comparison of computational time between centralized and distributed optimization

$N_{ m sc}$	1次迭代所需计算时间/s	
	集中式优化	分布式优化
1	10.99	4.43
50	43.83	4.59
100	98.16	4.83
500	529.65	4.94

式储能设备时的优越性。当继续增加每个节点的储 能设备数量(N_{se}=1000),MATLAB由于计算机内存 不足无法给出结果,这也从侧面验证了集中式优化 在处理大规模优化问题时需要大量的存储空间,控 制中心更面临设备间通信带宽与时延等问题,因而 难以扩展到大规模储能设备的协同控制中。

4 结论

本文针对需求侧大规模储能设备的协同电压调 节问题开展研究,提出了基于对偶一致性 ADMM 的 分布式电压控制方法,能够应对电网系统与储能设 备运行约束,为电网提供高效、可靠的电压支撑。仿 真结果表明,分布式优化方法具有与集中式优化方 法相似的储能设备功率调度与电压支撑效果,在协 调大规模分布式储能设备的应用场景中体现出更好 的扩展性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]辛保安.为实现"碳达峰、碳中和"目标贡献智慧和力量[N]. 人民日报,2021-02-23(1).
- [2] 王笑雪,徐弢,王成山,等. 基于 MAS 的主动配电网分布式电 压控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(11):2918-2926.
 WANG Xiaoxue,XU Tao,WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in active distribution networks utilizing multiple agent system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(11): 2918-2926.
- [3]朱晓荣,陈朝迁. 基于可控负荷与蓄电池储能的直流配电网电 压波动抑制[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):104-113.
 ZHU Xiaorong, CHEN Chaoqian. Voltage fluctuation suppression of DC distribution network based on controllable load and battery energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(8):104-113.
- [4] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1):215-233.
- [5] SHAFIEE Q, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Distributed secondary control for islanded microgrids-a novel approach [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 7018-1031.
- [6] WANG X, MENG K, GAO X, et al. Coordinated dispatch of virtual energy storage systems in LV grids for voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6):2452-2462.
- [7] YANG S, TAN S, XU J. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):4416-4426.
- [8]张江林,庄慧敏,刘俊勇,等.分布式储能系统参与调压的主动 配电网两段式电压协调控制策略[J].电力自动化设备,2019, 39(5):15-21,29.
 ZHANG Jianglin,ZHUANG Huimin,LIU Junyong, et al. Twostage coordinated voltage control scheme of active distribu-

tion network with voltage support of distributed energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):15-21,29.

[9]李相俊,盛兴,闫士杰,等.基于交替方向乘子法的超大规模储 能系统分布式协同优化[J].电网技术,2020,44(5):16811688.

LI Xiangjun, SHENG Xing, YAN Shijie, et al. Distributed cooperative optimization for ultra-large-scale storage system based on alternating direction multiplier method [J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1681-1688.

- [10] TANG Z, HILL D J, LIU T. Fast distributed reactive power control for voltage regulation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1):802-805.
- [11] ZHU H, LIU H J. Fast local voltage control under limited reactive power:optimality and stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3794-3803.
- [12] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. Foundation and Trends in Machine Learning, 2010, 3(1):1-222.
- [13] ŠULC P, BACKHAUS S, CHERTKOV M. Optimal distributed control of reactive power via the alternating direction method of multipliers [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014,29(4):968-977.
- [14] XU T, WU W. Accelerated ADMM-based fully distributed inverter-based volt / var control strategy for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020,16(12):7532-7543.
- [15] BANJAC G, REY F, GOULART P, et al. Decentralized resource allocation via dual consensus ADMM[EB/OL]. [2021-06-30]. http://arxiv.org/abs/1809.07376v1.
- [16] OLIVARES D E, CAÑIZARES C A, KAZERANI M. A centralized energy management system for isolated microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4):1864-1875.
- [17] ERSEGHE T A. Distributed and scalable processing method based upon ADMM[J]. IEEE Transactions on Signal Processing Letters, 2012, 19(9):563-566.
- [18] MATEOS G, BAZERQUE J A, GIANNAKIS G B. Distributed sparse linear regression[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(10): 5262-5276.
- [19] CHANG T H, HONG M, WANG X. Multi-agent distributed optimization via inexact consensus ADMM[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(2):482-497.
- [20] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2):1401-1407.
- [21] ZHANG Y, National Renewable Energy Laboratory. Solar power data for integration studies[EB/OL]. [2021-06-30]. https:// www.nrel.gov / grid / solar-power-data.html.
- [22] ENTSO-E. Data portal[EB / OL]. [2021-06-30]. https://openpower-system-data.org / data-sources.
- [23] OLSHEVSKY A, TSITSIKLIS J N. Convergence speed in and averaging[J]. Siam Review, 2011, 53(4):747-772.

作者简介:



王 泉(1990—),男,辽宁沈阳人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统运行 与控制、可再生能源系统建模与控制等 (**E-mail**:xiaowang@whu.edu.cn);

何怡刚(1966—),男,湖南邵阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为大电网智能监测与健康管理、能源物联网智能感知与控制技术等(E-mail:yghe1221@whu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

(下转第55页 continued on page 55)

cle route selection and charging navigation strategy considering time-of-use price[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(8):61-66.

- [18] WEI Z, LI Y, CAI L. Electric vehicle charging scheme for a park-and-charge system considering battery degradation costs [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018, 3(3): 361-373.
- [19] 孟旭瑶,张维戈,鲍谚,等.考虑充电功率的电动汽车快充站充 电设施优化配置[J].电力自动化设备,2018,38(7):28-34. MENG Xuyao,ZHANG Weige,BAO Yan, et al. Optimal configuration of charging facility for electric vehicle fast charging station considering charging power[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):28-34.

作者简介:



李 飞

李 飞(1982—),男,河北石家庄人, 高级工程师,博士研究生,研究方向为电力 系统营销:

梁宝全(1971—),男,天津人,高级工 程师,硕士,研究方向为营销管理技术;

张旭东(1974—),男,河北石家庄人, 高级工程师,研究方向为电力系统营销;

王鸿玺(1986—),男,河北石家庄人, 高级工程师,硕士,研究方向为电能计量与

电能采集技术(E-mail:down_in_river@163.com)。 (编辑 陆丹)

Adaptive dynamic incentive mechanism for service efficiency of EV fast charging station

LI Fei^{1,2}, LIANG Baoquan², ZHANG Xudong², WANG Hongxi², SUN Yi¹, MU Mingliang¹, LI Zekun¹ (1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Marketing Service Center of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Fast charging station is an important construction direction under the large-scale popularization of EVs (Electric Vehicles), and the utilization of charging facilities in the station directly determines the operating income of charging piles. The power attenuation of EVs in the late charging period will cause the cluster effect of slow power operation in the station, which will affect the overall profit efficiency of the fast charging station. Based on this, according to the different margins of charging facilities in the station, the differentiated service fee incentive mechanism of EVs is proposed to guide users to change their charging piles while ensuring user satisfaction degree, so as to maximize the service capacity of fast charging station. A simulation example is given to verify that the proposed adaptive dynamic incentive mechanism can effectively improve the economic benefit and user satisfaction degree of the fast charging station.

Key words: electric vehicles; fast charging stations; margin of charging facility; power attenuation; differentiated incentive; economic benefit; user satisfaction degree

(上接第30页 continued from page 30)

Distributed voltage control of distribution network considering large-scale energy storage

WANG Xiao¹, HE Yigang¹, MA Hengrui², LIU Xiaoyan¹, ZHANG Hui¹, GAO Wenzhong³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. New Energy(Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining 810016, China;

3. Department of Engineering and Computer Science, University of Denver, Denver 80208, USA)

Abstract: In order to achieve the large-scale utilization of energy storage resources, the cooperative control framework is constructed for large-scale energy storage devices, and the voltage control method of distribution network is proposed based on distributed optimization method. The proposed method uses the improved ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) to introduce the artificial consensus constraint in the dual problem of the optimization model, and only needs the neighboring communication to accomplish fully distributed charging and discharging of energy storage devices and the voltage support of distribution network. Simulation case based on IEEE 33-bus system verifies the effectiveness of the proposed method. Simulative results show that the distributed cooperative control can quickly converge to the optimal solution of the optimization problem, which benefits to suppress the impacts of the fluctuation of renewable energy sources on the power grid, and guarantees the security and stability of grid voltage with desired scalability and applicability.

Key words: large-scale energy storage; ADMM; distribution network; voltage control; distributed control







Fig.A1 Distributed control architecture of energy storage devices in IEEE 33-bus distribution system

表 A1 储能设备参数设置			
Table A1 Parameters of	energy storage devices		
参数范围	控制参数		
$P_i^{\rm b,max} \in [50,100] \rm kW$	$V^{\min}=0.95$ p.u.		
$E_i^{\mathrm{b,max}} \in [500, 1000] \mathrm{kW}\cdot\mathrm{h}$	V ^{max} =1.05 p.u.		
$\eta_i^c \in [0.85, 0.95]$	ho=0.01		
<i>ai</i> ∈ [1,6]	$arepsilon_1=0.05, arepsilon_2=0.1$		
$b_i \in [1,6]$	$K_{\rm max}$ =500		



图 A2 光伏、负荷 24 h 内功率变化





(a) 系统各节点电压三维视图



Fig.A3 Voltages at different buses in distribution network without energy storage response



Fig.A4 Voltages at different buses in distribution network with energy storage response



图 A5 分布式优化方法下储能设备的充、放电功率及 SOC 值

Fig.A5 Charging and discharging power and SOC value of energy storage devices under distributed optimization

method