

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.01.010

计及储能控制的100%新能源电力系统无功优化方法

张阳¹, 李佳朋¹, 张伟², 武海燕³, 张敬一¹, 李宇骏¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:针对无同步电源支撑的100%新能源电力系统功率波动大和电压水平低等问题,文中分析了储能变流器控制机理,建立计及储能控制和考虑直流外送特性的100%新能源电力系统无功优化模型,提出一种基于储能变流器控制的无功优化方法。该方法可以利用储能变流器控制对系统无功进行优化配置,在储能参与有功功率平衡的基础上进一步发挥储能参与调压的能力,兼顾经济运行与系统电压水平的提升。此外,为满足新能源系统经直流外送的需求,文中建立基于直流通道运行特性的数学模型,优化结果可应用于直流输电曲线规划。最后,选取中国西北地区某无同步电源支撑的县域电网为算例,基于MATLAB中的Yalmip平台求解出电网中各节点有功、无功决策变量的出力,验证所提方法的有效性。

关键词:新能源电力系统;储能控制;无功优化;电压支撑;直流外送;经济运行

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2026)01-0106-09

0 引言

大力发展风电、光伏等新能源发电,逐步替代传统化石能源机组,是加快新型电力系统建设、推动能源绿色低碳转型的重要途径^[1-7]。国家发展改革委员会、国家能源局发布的《“十四五”可再生能源发展规划》和《新型电力系统发展蓝皮书》政策文件指出,应加快推动大型风电、光伏基地建设,结合新型储能和光热发电等调节支撑性资源,形成多能互补的开发格局^[8-9]。在此发展背景下,小区域电力系统可充分利用区内资源,构建源网荷储协调运行的发展模式,实现区域内100%新能源供电。

然而,100%新能源电力系统的运行控制与现有电网显著不同。一方面,新能源出力的不确定性,导致系统在安全运行条件下难以维持有功功率平衡,可能出现新能源供电功率缺额或弃风弃光现象^[10-12];另一方面,对于远离负荷中心、无同步电源支撑的100%新能源电力系统,其电网强度较低,电压稳定裕度和动态电压支撑能力远低于以传统同步电源为主导的电力系统,电压稳定性问题突出^[13]。针对上述问题,可充分利用储能的运行机理,通过变流器控制调节其输出功率因数,灵活分配有功和无功的输出,在实现有功功率削峰填谷的同时,也对系统无功功率进行优化调节,即在保证有功平衡的同时保证电压控制能力。该思路有望成为解决100%新能源电力系统运行难题的有效途径。

目前,针对含大规模风光电源的电力系统无功

优化调度问题,已有大量研究。文献[14]提出一种基于分布式光伏集群划分的电压调控策略,可有效解决光伏接入电网而引起的电压越限问题;文献[15]考虑风电场的鲁棒无功功率调节范围,提出一种包含双馈风机发电场并网的电网无功优化的方法;文献[16]在区域电网的无功优化中,将风电、光伏发电公共耦合点处的无功出力上下限纳入约束条件;文献[17]建立多场景下考虑风光机组并网无功调节能力的电力系统无功优化模型。

当前研究大多只考虑了利用风电、光伏发电的无功调节能力进行优化。在无同步电源的100%新能源电力系统中,为保证系统对风电、光伏等新能源的消纳率,通常需要其承担主要的发电任务,并且风电、光伏发电一般设置在放射式拓扑的末端,其无功调节能力有限,对于维持电网电压水平的作用较小。与此同时,新能源电力系统一般配置较大容量的储能装置,其具有快速充放电的功能,可以实现充电与放电在时空上的解耦^[18],已被广泛运用于电力系统新能源的消纳、调峰以及调频等辅助服务^[19-22]。因此,如何充分利用储能电站的无功支撑潜力,提高系统的无功调节能力,进而优化系统的电压水平,成为亟须深入研究的关键问题。

为解决上述问题,文中主要贡献如下:

(1) 建立100%新能源系统风电、光伏、储能发电特性和直流运行特性的数学模型。

(2) 基于储能的运行机理,提出计及储能无功控制的100%新能源电力系统无功优化方法,并验证所提方法的有效性和优越性。

(3) 分析直流调节能力对系统综合运行成本与

收稿日期:2025-05-25;修回日期:2025-08-02

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB2405900)

系统电压水平的影响,为直流通道输电曲线的优化规划提供参考。

1 100% 新能源电力系统模型

为模拟 100% 新能源电力系统供电场景,建立了 100% 新能源电力系统拓扑模型,如图 1 所示。该模型主要包括风力发电场站、光伏发电场站、储能装置、本地负荷 L_m 和 L_n 、直流通道和交流大电网六部分。本区域 100% 新能源电力系统由风光新能源发电、储能装置和本地负荷构成,经柔性直流与外界交流大电网互联,可实现功率倒送和新能源的异地消纳。

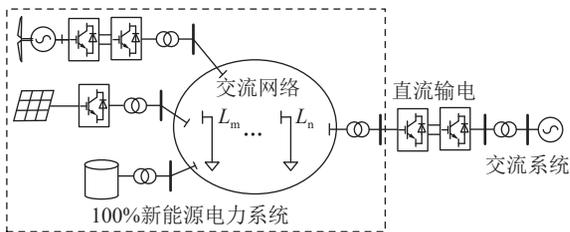


图 1 100% 新能源电力系统经直流外送的拓扑
Fig.1 Topology of 100% renewable energy power system by DC transmission

风光出力和本地负荷采用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络方法^[23-26]进行预测,具体流程如图 2 所示。

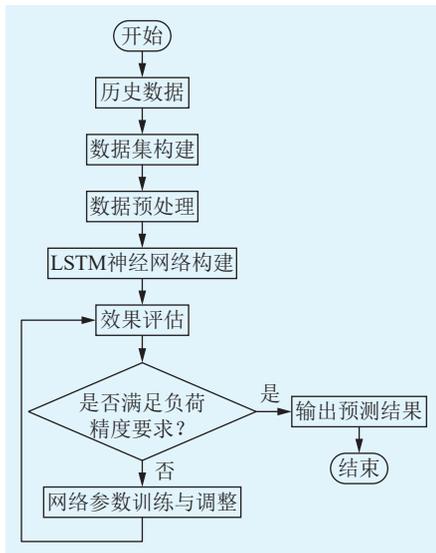


图 2 基于 LSTM 神经网络方法的预测流程
Fig.2 Prediction process based on LSTM neural network method

步骤 1: 输入本地风光出力和负荷需求的历史数据,构建数据集。

步骤 2: 对数据集进行预处理和转化,得到训练集和测试集。

步骤 3: 构建 LSTM 神经网络模型。

步骤 4: 测试和评估预测结果,不断对网络参数进行训练与调整直至满足精度要求,并输出预测结果。

利用 k -means 聚类算法和 Pearson 相关系数,选取典型日的风电、光伏出力和本地负荷需求的时序数据,对其特性进行描述。对于任意时刻 t , 100% 新能源电力系统均需满足新能源出力约束、储能运行约束、直流通道运行约束、潮流约束和安全运行约束。通过分析 100% 新能源电力系统各部分的运行特性,依次建立各环节的数学模型。

1.1 新能源出力模型

新能源发电包含风力发电和光伏发电,分别建立各机组出力模型。

(1) 风力发电机组出力模型。

$$P_i^{\text{wind.min}} \leq P_{i,t}^{\text{wind}} \leq P_i^{\text{wind.max}} \quad (1)$$

$$Q_i^{\text{wind.min}} \leq Q_{i,t}^{\text{wind}} \leq Q_i^{\text{wind.max}} \quad (2)$$

$$Q_{i,t}^{\text{wind}} = P_{i,t}^{\text{wind}} \tan \theta_i^{\text{wind}} \quad (3)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{wind}}$ 为 t 时刻风机注入节点 i 的实际有功功率; $P_i^{\text{wind.min}}$ 、 $P_i^{\text{wind.max}}$ 分别为风机注入节点 i 的实际有功功率的下限值和上限值; Q_i^{wind} 为 t 时刻风机注入节点 i 的实际无功功率; $Q_i^{\text{wind.min}}$ 、 $Q_i^{\text{wind.max}}$ 分别为风机注入节点 i 的实际无功功率的下限值和上限值; θ_i^{wind} 为节点 i 风机变流器的功率因数角, $\tan \theta_i^{\text{wind}}$ 取 0.426^[27-28]。

(2) 光伏发电机组出力模型。

$$P_i^{\text{pv.min}} \leq P_{i,t}^{\text{pv}} \leq P_i^{\text{pv.max}} \quad (4)$$

$$Q_i^{\text{pv.min}} \leq Q_{i,t}^{\text{pv}} \leq Q_i^{\text{pv.max}} \quad (5)$$

$$Q_{i,t}^{\text{pv}} = P_{i,t}^{\text{pv}} \tan \theta_i^{\text{pv}} \quad (6)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{pv}}$ 为 t 时刻光伏注入节点 i 的实际有功功率; $P_i^{\text{pv.min}}$ 、 $P_i^{\text{pv.max}}$ 分别为光伏注入节点 i 的实际有功功率的下限值和上限值; Q_i^{pv} 为 t 时刻光伏注入节点 i 的实际无功功率; $Q_i^{\text{pv.min}}$ 、 $Q_i^{\text{pv.max}}$ 分别为光伏注入节点 i 的实际无功功率的下限值和上限值; θ_i^{pv} 为节点 i 光伏变流器的功率因数角, $\tan \theta_i^{\text{pv}}$ 取 0.329^[27]。

1.2 储能控制和运行模型

储能装置的运行机理是通过储能变流器调节网侧电压 E 与电流 I 的相位关系,实现四象限运行,从而灵活调控其有功和无功的输出^[29-30]。基于此原理,利用储能变流器进行无功控制,可在不增加额外建设成本的前提下实现无功优化,提高系统的电压水平。

(1) 储能装置的控制机理。储能变流器模型如图 3 所示。由图 3 可知, U_{dc} 为电容电压,以网侧电压 E 为参考,通过改变交流侧电压 U 控制网侧电流 I ,

从而改变网侧电压 E 与电流 I 相位差, 实现储能与电网之间有功和无功功率的交换, 其功率调节范围如图 4 所示。其中 S_N 为储能装置的额定容量; P_{ess} 、 Q_{ess} 分别为储能装置的有功和无功的调节能力; P_{max} 为储能装置有功调节能力的最大值; φ_{max} 、 φ_{min} 分别为储能装置的最大和最小功率因数, 阴影部分即为储能装置的可调节范围。

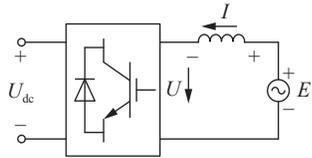


图 3 储能变流器模型

Fig.3 Energy storage converter model

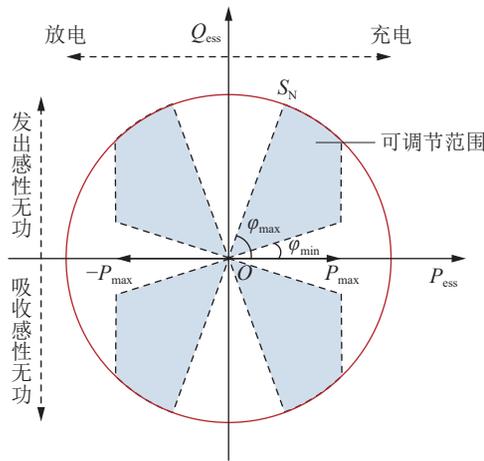


图 4 储能变流器功率调节范围

Fig.4 The power regulation range of energy storage converter

(2) 储能运行约束。储能装置在运行中需要满足一定的运行约束, 包括: 储能吸收和释放功率约束, 即式(7)—式(11); 储能容量约束, 即式(12)—式(14); 保证在调度周期内始末时刻容量相等约束, 即式(15)。

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq u_{i,t,1} P_i^{\text{max}} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq (1 - u_{i,t,1}) P_i^{\text{max}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} (1 - u_{i,t,2}) Q_{i,t}^{\text{ch,min}} \leq Q_{i,t}^{\text{ch}} \leq (1 - u_{i,t,2}) Q_{i,t}^{\text{ch,max}} \\ Q_{i,t}^{\text{ch,min}} = (P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}}) \tan(\arccos \varphi_{i,\text{max}}) \\ Q_{i,t}^{\text{ch,max}} = (P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}}) \tan(\arccos \varphi_{i,\text{min}}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_{i,t,2} Q_{i,t}^{\text{dis,min}} \leq Q_{i,t}^{\text{dis}} \leq u_{i,t,2} Q_{i,t}^{\text{dis,max}} \\ Q_{i,t}^{\text{dis,min}} = (P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}}) \tan(\arccos \varphi_{i,\text{max}}) \\ Q_{i,t}^{\text{dis,max}} = (P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}}) \tan(\arccos \varphi_{i,\text{min}}) \end{cases} \quad (10)$$

$$(Q_{i,t}^{\text{dis}} + Q_{i,t}^{\text{ch}})^2 + (P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}})^2 \leq S_{i,N}^2 \quad (11)$$

$$E_{i,t=0} = E_{i,0} \quad (12)$$

$$E_i^{\text{min}} \leq E_{i,t} \leq E_i^{\text{max}} \quad (13)$$

$$E_{i,t} = E_{i,t-1} + \eta_i^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta_i^{\text{dis}}} P_{i,t}^{\text{dis}} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \eta_i^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{1}{\eta_i^{\text{dis}}} P_{i,t}^{\text{dis}} = 0 \quad (15)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时刻节点 i 储能的有功吸收功率和释放功率; P_i^{max} 为节点 i 储能吸收和释放的最大有功功率; $Q_{i,t}^{\text{ch}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时刻节点 i 储能的无功吸收功率和释放功率; $Q_{i,t}^{\text{dis,max}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{dis,min}}$ 分别为 t 时刻节点 i 储能释放的最大和最小无功功率; $Q_{i,t}^{\text{ch,max}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{ch,min}}$ 分别为 t 时刻节点 i 储能吸收的最大和最小无功功率; $\varphi_{i,\text{max}}$ 、 $\varphi_{i,\text{min}}$ 分别为节点 i 储能变流器功率因数的最大值和最小值; $u_{i,t,1}$ 、 $u_{i,t,2}$ 为 0-1 变量, $u_{i,t,1}$ 为 t 时刻节点 i 储能吸收和释放有功功率的状态, $u_{i,t,2}$ 为 t 时刻节点 i 储能吸收和释放无功功率的状态, 取 1 表示释放功率, 0 表示吸收功率; $S_{i,N}$ 为节点 i 储能的额定容量; $E_{i,0}$ 为节点 i 储能的初始荷电量; $E_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 储能在调度中的荷电量; E_i^{max} 、 E_i^{min} 分别为节点 i 储能在调度中的荷电量最大值、最小值; η_i^{ch} 、 η_i^{dis} 分别为节点 i 储能吸收和释放功率的效率; T 为调度周期, 取值为 24 h; N 为电网节点数。

1.3 直流通道运行模型

100% 新能源电力系统通过柔性直流与外界交流系统进行功率交换, 而功率传输曲线受直流通道容量和运行方式的限制, 应满足以下约束:

$$P_{\text{DC}}^{\text{min}} \leq P_t^{\text{DC}} \leq P_{\text{DC}}^{\text{max}} \quad (16)$$

式中: P_t^{DC} 为 t 时刻直流传输功率; $P_{\text{DC}}^{\text{min}}$ 、 $P_{\text{DC}}^{\text{max}}$ 分别为直流传输功率下限值和上限值。

考虑到柔性直流输电对传输功率的调节速率存在限制, 故直流通道的运行方式应满足直流功率爬坡约束:

$$R^d \leq |P_t^{\text{DC}} - P_{t-1}^{\text{DC}}| \leq R^u \quad (17)$$

式中: R^u 、 R^d 分别为直流传输功率的最大上、下坡速率。

此外, 文中采用阶梯化输电的方式表征直流系统的调节特性, 并通过式(18)—式(20)所示的最小直流恒定运行时长约束, 刻画直流调节的灵活性。

$$|P_t^{\text{DC}} - P_{t-1}^{\text{DC}}| \leq \delta_t^{\text{dc}} P_{\text{DC}}^{\text{max}} \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^{t+\tau} \delta_t^{\text{dc}} \leq 1 \quad (19)$$

$$\delta_t^{\text{dc}} = 0 \quad \forall t + \tau \geq T \quad (20)$$

式中: δ_t^{dc} 为 0-1 变量, 表示 t 时刻直流系统是否进行功率调节, 若功率调节则取 1, 否则取 0; τ 为最小直

流电流恒定运行时长。

1.4 潮流模型

采用 Distflow 形式的电力系统潮流模型如图 5 所示。该模型通过简化处理,省略了相角变量,仅保留节点电压变量,并将电压、电流和功率的约束与配电网潮流的双向流动性相结合,从而构建了一个适用于潮流优化的模型^[31]。

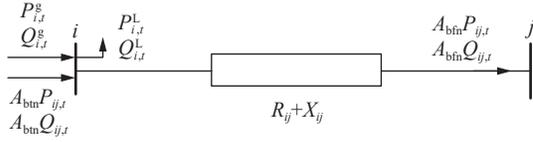


图 5 基于 Distflow 形式的电网潮流示意

Fig.5 Schematic diagram of power grid flow based on the Distflow expression

电网潮流平衡约束为:

$$\begin{cases} P_{i,t}^g - P_{i,t}^L + A_{bmi}P_{ij,t} - A_{bmi}I_{ij,t}^2R_{ij} - A_{bmi}P_{ij,t} = 0 \\ Q_{i,t}^g - Q_{i,t}^L + A_{bmi}Q_{ij,t} - A_{bmi}I_{ij,t}^2X_{ij} - A_{bmi}Q_{ij,t} = 0 \\ V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 = 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) - (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)I_{ij,t}^2 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{i,t}^g$ 、 $Q_{i,t}^g$ 分别为 t 时刻注入节点 i 的有功功率和无功功率; $P_{i,t}^L$ 、 $Q_{i,t}^L$ 分别为 t 时刻节点 i 的有功负荷和无功负荷; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻支路 ij 传输的有功功率和无功功率; A_{bmi} 、 A_{bmi} 为系统的节点 i 和节点 j 的功率流向关系,当功率从节点 i 流入节点 j 流出时, A_{bmi} 为 1,当功率从节点 j 流入节点 i 流出时, A_{bmi} 为 1; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 电流的有效值; $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 、节点 j 的电压有效值; R_{ij} 、 X_{ij} 分别为支路 ij 的电阻值和电抗值。

1.5 安全运行约束

为保证电力系统的安全运行,需要对各节点电压和各支路电流与功率进行约束,主要有式(22)所示节点电压约束、式(23)所示支路电流约束和式(24)所示线路传输功率约束。

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max} \quad (22)$$

$$I_{ij}^{\min} \leq I_{ij,t} \leq I_{ij}^{\max} \quad (23)$$

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq S_{ij,\max}^2 \quad (24)$$

式中: V_i^{\min} 、 V_i^{\max} 分别为节点 i 电压下限值和上限值; I_{ij}^{\min} 、 I_{ij}^{\max} 分别为支路 ij 电流下限值和上限值; $S_{ij,\max}$ 为支路 ij 传输功率上限值。

2 计及储能控制的 100% 新能源电力系统无功优化模型

2.1 100% 新能源电力系统无功优化模型

基于 100% 新能源电力系统各环节的运行模型,文中建立计及储能控制的 100% 新能源电力系

统无功优化模型。该模型以各节点注入功率和储能运行情况为决策变量。为兼顾电网运行的经济性和安全性,目标函数由电网综合运行成本和节点电压偏差两部分构成。其中,电网综合运行成本包括网损成本、弃风弃光惩罚成本、储能运行成本和直流调节成本。由于目标函数中两部分的量纲不同,采用线性加权的方式进行归一化处理,通过权重系数反映电网经济性指标和安全性指标的相对重要程度,其具体形式如式(25)所示。

$$\min F = \gamma_1 F_1 + \gamma_2 F_2 \quad (25)$$

$$F_1 = \sum_{t=1}^T (g_{1,t} + g_{2,t} + g_{3,t} + g_{4,t}) \quad (26)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T |V_{i,t}^2 - V_{i,N}^2| \quad (27)$$

式中: F_1 为电网综合运行成本; F_2 为电网各节点电压总偏差; γ_1 为电力系统经济性指标的权重系数; γ_2 为电力系统安全性指标的权重系数; $g_{1,t}$ 为系统 t 时刻的网损成本; $g_{2,t}$ 为系统 t 时刻的弃风弃光惩罚成本; $g_{3,t}$ 为系统 t 时刻的储能与电网交互功率成本; $g_{4,t}$ 为系统 t 时刻的直流调节成本; $V_{i,N}$ 为节点 i 的电压参考值。其中,网损成本、弃风弃光惩罚成本、储能运行成本和直流调节成本的计算方法如下:

(1) 网损成本。

$$g_{1,t} = \sum_{ij} c_1 I_{ij,t}^2 R_{ij} \Delta t \quad (28)$$

式中: c_1 为网损成本系数; Δt 为时间变化量。

(2) 弃风弃光惩罚成本。

$$g_{2,t} = \sum_{i=1}^N c_2 (P_{i,t}^{\text{wind},f} - P_{i,t}^{\text{wind}}) \Delta t + \sum_{i=1}^N c_2 (P_{i,t}^{\text{pv},f} - P_{i,t}^{\text{pv}}) \Delta t \quad (29)$$

式中: c_2 为弃风弃光惩罚系数; $P_{i,t}^{\text{wind},f}$ 、 $P_{i,t}^{\text{pv},f}$ 分别为 t 时刻节点 i 的风机和光伏可捕获的功率。

(3) 储能运行成本。

$$g_{3,t} = \sum_{i=1}^N c_3 (P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}}) \Delta t \quad (30)$$

式中: c_3 为储能运行成本系数。

(4) 直流调节成本。

$$g_{4,t} = c_4 |P_t^{\text{DC}} - P_{t-1}^{\text{DC}}| \quad (31)$$

式中: c_4 为直流调节成本系数。

2.2 模型处理

由于式(21)所描述的潮流模型具有强非凸形式,导致该优化模型为非凸规划,难以求解。为此,文中引入二阶锥松弛技术,将原问题的非凸可行域松弛为凸锥形式,从而将原模型转化为混合整数的二阶锥凸优化模型,提升其可解性。

首先,引入式(32)中变量代替无功优化模型中的对应项:

$$\begin{cases} U_{i,t} = V_{i,t}^2 \\ U_{j,t} = V_{j,t}^2 \\ U_{i,N} = V_{i,N}^2 \end{cases} \quad (32)$$

$$L_{ij,t} = I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} \quad (33)$$

由于 L_{ij} 等式约束导致模型非凸,可将其松弛为相应的不等式约束以实现凸化。

$$L_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}} \quad (34)$$

将其等价转化为二阶锥标准形式,如式(35)所示,并作为新增约束引入模型中。

$$\begin{cases} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ L_{ij,t} - U_{i,t} \end{cases} \leq L_{ij,t} + U_{i,t} \quad (35)$$

此外,式(27)包含绝对值函数项,利用大 M 法并通过引入辅助变量对其进行线性化处理。

$$\begin{cases} F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T U_{i,t}^{\text{abs}} \\ 0 \leq U_{i,t}^{\text{abs}} + U_{i,t} - U_{i,N} \leq M\delta_{i,t,1} \\ 0 \leq U_{i,t}^{\text{abs}} - U_{i,t} + U_{i,N} \leq M\delta_{i,t,2} \\ \delta_{i,t,1} + \delta_{i,t,2} = 1 \end{cases} \quad (36)$$

式中: $U_{i,t}^{\text{abs}}$ 为引入的辅助变量; $\delta_{i,t,1}$ 、 $\delta_{i,t,2}$ 为引入的二进制辅助变量。同理,对式(31)中包含的绝对值函数项,进行相同的线性化处理。

2.3 求解算法

文中对包含非线性项的约束和目标函数进行一系列线性化处理,最终得到一个多变量、多约束、大规模混合整数线性规划模型。商业求解器Mosek基于内点法,可以高效、快速地求解具有实数和混合整数变量的大型稀疏线性二次优化问题,以及仅含实数变量的凸锥优化问题,其算法特性与文中所构建模型高度契合。因此,可通过MATLAB中的Yalmip工具箱调用Mosek求解器对该模型进行求解。

3 算例分析

3.1 算例参数

文中以某无同步电源支撑的县域电网为算例,通过柔性直流输电与交流大电网互联,构成一个100%新能源电力系统,其等效拓扑如图6所示。 W_1 、 W_2 表示风机, PV_1 、 PV_2 表示光伏,ESS表示储能装置。其中,直流通道的输电容量为150 MW,电网中各电源节点的装机容量和储能容量如表1

所示。

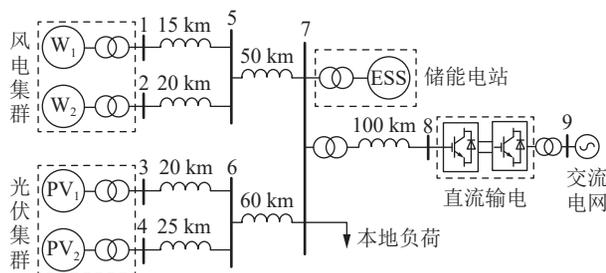


图6 某县域100%新能源电力系统拓扑

Fig.6 Topology of 100% renewable energy power system in a county

表1 电网中各电源节点的装机容量和储能容量
Table 1 The installed capacity and energy storage capacity of each power node in the power grid

节点	光伏/MW	风电/MW	储能/MW
1		80	
2		100	
3	80		
4	60		
7			50

将风电、光伏出力和负荷需求的历史数据作为输入,基于LSTM算法进行预测,得到典型日的风电、光伏出力和负荷预测曲线如图7所示。将预测结果作为该算例相应节点的输入数据。取系统的功率基准值为 $S_B=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$,电压基准值为 $U_B=110 \text{ kV}$,其余算例参数如表2所示。

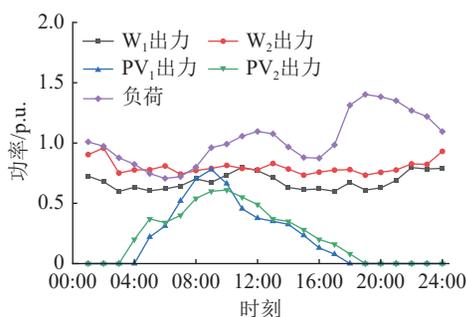


图7 某县域风光出力和负荷预测曲线

Fig.7 Forecast curves of wind and photovoltaic output and local load in a county

3.2 权重系数对优化结果影响

目标函数中权重系数的取值反映了电网经济性和安全性指标的相对重要程度。不同权重系数组合对于优化结果具有一定的影响,相应的电网综合运行成本 F_1 和电网各节点电压总偏差 F_2 见表3。

由表3可知,电网的经济性与安全性存在一定的矛盾关系,即综合运行成本 F_1 越低,各节点电压总偏差 F_2 越高。因此,在实际应用中应根据具体运行需求确定电网经济性与安全性指标的权重系

表2 算例参数

Table 2 Simulation parameters

参数	数值
$c_1/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.5
$c_2/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.4
$c_3/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.3
$c_4/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.6
$S_N/(\text{MW}\cdot\text{h})$	150
$\varphi_{\max}/\text{rad}$	0.72
$\varphi_{\min}/\text{rad}$	0.32
τ/h	2

表3 不同权重系数下目标函数值

Table 3 The value of the objective function under different weight coefficients

γ_1	γ_2	$F_1/\text{万元}$	$F_2/\text{p.u.}$
0.3	0.7	43.86	0.004 2
0.4	0.6	42.67	0.005 1
0.5	0.5	41.69	0.006 2
0.6	0.4	41.18	0.007 2
0.7	0.3	40.43	0.008 4

数。例如,在新能源出力波动较大时,电压幅值波动较大,系统电压稳定性难以得到保证,此时应赋予电压偏差更高的权重以优先保障安全运行。为了使电网经济性和安全性指标具有同等重要程度,二者权重系数均设为0.5。

3.3 优化结果的对比分析

文中设计了2个优化案例。案例1:储能仅参与电网的有功功率优化。案例2:储能同时参与电网的有功、无功功率优化。

表4给出了2个案例下系统一日运行的各项成本。由表4可知,相比于案例1,案例2因增加了储能无功控制,其运行成本有所提高,但系统的线路损耗成本和弃风弃光惩罚成本明显减少。这说明,通过储能变流器对系统的无功功率进行优化控制,不仅可以提高新能源的消纳水平,还可以降低线路损耗,使得系统的总运行成本减小,从而实现更优的经济调度效果。

为衡量系统节点电压水平,文中定义了平均电压偏差 \bar{U}_t 和节点电压安全裕度指标 $U_{s,i}$ 。

$$\bar{U}_t = \frac{\sum_{i=1}^N |U_{i,t} - U_N|}{N} \quad (37)$$

$$U_{s,i} = U_{s,i}^{\max} - \max_t \{|U_{i,t} - U_N|\} \quad (38)$$

式中: U_N 为系统的额定电压; $U_{s,i}^{\max}$ 为节点*i*电压安全裕度最大值。

表4 电网各运行成本

Table 4 The grid operating costs 单位:万元

案例	网损成本	弃风弃光惩罚成本	储能运行成本	直流调节成本	总成本
1	19.65	6.77	8.93	7.28	42.63
2	18.54	6.67	9.23	7.25	41.69

在案例2中,通过调整经济性和安全性权重系数,使其总运行成本与案例1相同。在此前提下,两者的平均节点电压偏差和安全裕度分别如图8和图9所示。可以看出,案例2通过储能系统的无功调控能力,显著降低了平均电压偏差,并大幅提升了节点电压安全裕度,有效改善了系统电压稳定性。

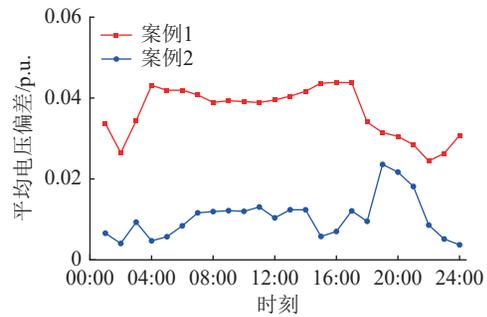


图8 系统平均节点电压偏差曲线

Fig.8 System average node voltage deviation curves

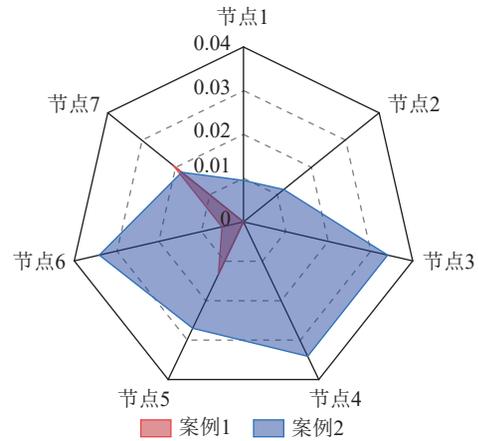


图9 系统节点电压安全裕度

Fig.9 System node voltage safety margin

3.4 直流调节作用对优化结果影响

直流系统的调节能力受爬坡速率和最小恒定运行时长的约束。设置4种最大爬坡速率和最小恒定运行时长组合,如表5所示,分析不同直流调节性能对优化结果的影响。

不同直流调节能力下的优化结果如表6所示。可以看出,随着直流调节性能的增强,弃风弃光惩罚成本明显减小,表明直流系统有效缓解了由风电、光伏出力波动引起的功率不平衡问题。相应地,系统对新能源机组出力波动程度的承受能力增强,新能源消纳水平提高,总运行成本随之减小,而

表 5 直流调节参数
Table 5 DC regulation parameters

组合	最大爬坡速率/p.u.	最小恒定运行时长/h
1	0.5	2
2	0.5	4
3	0.2	2
4	0.2	4

系统的电压水平会略微降低,但仍在安全运行范围内。各直流通道的输电曲线如图 10 所示,由此可知,增强直流调节能力有助于提升直流通道的利用小时数,进一步提高了直流通道的运行效率。

表 6 不同直流调节能力下的优化结果
Table 6 Optimization results with different DC regulation capabilities

组合	弃风弃光惩罚成本/万元	总成本/万元	平均电压偏差/p.u.
1	3.74	41.69	0.006 2
2	19.24	52.46	0.005 6
3	27.45	58.17	0.005 5
4	37.57	65.77	0.005 0

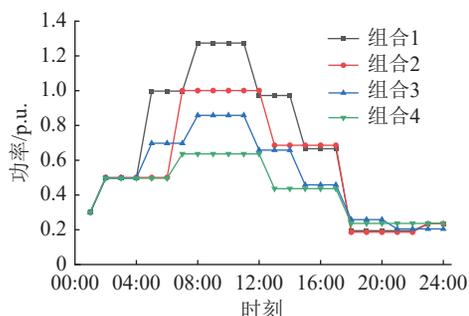


图 10 不同调节能力下的直流通道输电曲线
Fig.10 DC transmission curves with different regulation capacities

4 结论

针对无同步电源支撑的 100% 新能源电力系统有功平衡困难、无功电压支撑能力不足以及直流输电曲线规划等问题,文中建立涵盖风电、光伏、储能出力特性和直流运行特性的数学模型,并提出计及储能无功控制能力的优化调度方法,结论如下:

(1) 文中所提无功优化方法可降低网络损耗,减小电网综合运行成本,并在总运行成本不变的情况下,有效降低系统的平均电压偏差,增加系统的节点电压安全裕度,从而提高系统的电压安全稳定水平。

(2) 提高直流调节能力对系统电压水平影响较小,但可以有效提高新能源消纳和直流通道的平均

利用小时数,为直流外送调节性能的设置和输电曲线优化规划提供了参考价值。

此外,文中仅重点关注储能自身的无功调节作用,未涉及储能与其他无功装置的配合,在后续工作中将进一步研究储能与其他动态无功源的实时协调控制。

参考文献:

[1] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[2] 孙大雁,耿建,杨胜春,等.新型电力系统环境下煤电与新能源等多元资源协调优化运行及其挑战[J].电网技术,2024,48(8):3105-3113.
SUN Dayan, GENG Jian, YANG Shengchun, et al. Challenges of coordinated and optimized operation of coal power and new energy and other diversified resources in new power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3105-3113.

[3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904,2205.

[4] 杨大坤,张大海,严嘉豪,等.计及源-荷-环境之间多影响因素耦合的风-光-荷联合场景生成[J].电力系统保护与控制,2025,53(23):63-74.
YANG Dakun, ZHANG Dahai, YAN Jiahao, et al. Multi-factor coupled scenario generation for wind-solar-load systems considering source-load-environment interactions[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(23): 63-74.

[5] 姜立兵,申建华,庞万,等.考虑碳超额率和电转气的园区综合能源优化运行方法[J].南方能源建设,2025,12(3):102-114.
JIANG Libing, SHEN Jianhua, PANG Wan, et al. Optimization operation method for integrated energy systems in parks considering carbon excess rate and electricity-to-gas conversion[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(3): 102-114.

[6] 王亚军,王继东,曹曼,等.光伏电站理论发电功率的优化计算模型与方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(14):144-153.
WANG Yajun, WANG Jidong, CAO Man, et al. Optimization calculation models and methods for the theoretical power of a photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 144-153.

[7] 袁天梦,杨一宁,胡泽春.考虑分布式光伏和储能接入的中低压配电网多时间尺度优化调度策略[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):101-112.
YUAN Tianmeng, YANG Yining, HU Zechun. Multi-time scale optimal dispatch strategy for medium-voltage and low-voltage distribution networks with distributed PV and BESS access[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1):

- 101-112.
- [8] 国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. (2023-06-01) [2024-07-24]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P02022060150105485882.pdf>.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. "14th five-year" re-newable energy development plan[EB/OL]. (2023-06-01) [2024-07-24]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P02022060150105485882.pdf>.
- [9] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[EB/OL]. (2023-06-02) [2024-07-24]. <https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/P020230823671991045922.pdf>.
National Energy Administration. Blue book on the development of new power systems[EB/OL]. (2023-06-02) [2024-07-24]. <https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/P020230823671991045922.pdf>.
- [10] 许涛, 王国春, 董昱, 等. 新型电力系统平衡机理及演进过程研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(1): 1-14.
XU Tao, WANG Guochun, DONG Yu, et al. Research on power balance mechanism and evolution of new power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(1): 1-14.
- [11] 韩佳, 邓钰婷, 耿子越, 等. 大规模风电场协调控制架构及算法综述[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(1): 1-18.
HAN Ji, DENG Yuting, GENG Ziyue, et al. Review of coordinated control architectures and algorithms for large-scale wind farms[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(1): 1-18.
- [12] 陶劲宇, 秦川, 金宇清, 等. 面向新型电力系统的负荷模型研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(5): 168-187.
TAO Jinyu, QIN Chuan, JIN Yuqing, et al. A review of load models for new power systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(5): 168-187.
- [13] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(6): 1843-1856.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [14] 黄冬梅, 杨凯, 余京朋, 等. 考虑净负荷均衡的分布式光伏集群电压调控策略研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(10): 4275-4287.
HUANG Dongmei, YANG Kai, YU Jingpeng, et al. Research on voltage regulation strategy of distributed photovoltaic cluster considering the payload balancing[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(10): 4275-4287.
- [15] ZHOU Y, LI Z S, WANG G R. Study on leveraging wind farms' robust reactive power range for uncertain power system reactive power optimization[J]. *Applied Energy*, 2021, 298: 117130.
- [16] HE H, LI J, ZHAO W Z, et al. Reactive power and voltage optimization of new-energy grid based on the improved flower pollination algorithm[J]. *Energies*, 2022, 15(10): 3653.
- [17] EBEEED M, ALHEJJI A, KAMEL S, et al. Solving the optimal reactive power dispatch using marine predators algorithm considering the uncertainties in load and wind-solar generation systems[J]. *Energies*, 2020, 13(17): 4316.
- [18] 赵冬梅, 徐辰宇, 陶然, 等. 多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1776-1799.
ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1776-1799.
- [19] 谢雨龙, 罗逸飏, 李智威, 等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置[J]. *高电压技术*, 2022, 48(11): 4403-4413.
XIE Yulong, LUO Yiyang, LI Zhiwei, et al. Optimal allocation of shared energy storage considering the economic consumption of microgrid new energy[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(11): 4403-4413.
- [20] ZHANG S X, LI Y W, LIU W S, et al. Optimal planning of cloud energy storage system serving multiple high proportion renewable energy microgrids[C]//2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Chengdu, China. IEEE, 2022: 113-119.
- [21] 马玉路. 风储联合运行参与电网一次调频优化控制技术[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
MA Yulu. Optimal control technology of primary frequency regulation in power grid with wind-storage combined operation[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.
- [22] 王颖, 王晓文, 陆铭阳. 新能源高占比电力系统惯量相关问题研究[J]. *东北电力技术*, 2023, 44(2): 20-27, 46.
WANG Ying, WANG Xiaowen, LU Mingyang. Research on inertia related problems of high proportion of new energy resources in power system[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2023, 44(2): 20-27, 46.
- [23] 王涛, 王旭, 许野, 等. 计及相似日的 LSTM 光伏出力预测模型研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(8): 316-323.
WANG Tao, WANG Xu, XU Ye, et al. Study on LSTM photovoltaic output prediction model considering similar days[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(8): 316-323.
- [24] 王涛, 李薇, 许野, 等. 计及相似日的 VMD-FE-LSTM 光伏出力组合预测模型研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(5): 490-499.
WANG Tao, LI Wei, XU Ye, et al. Study on photovoltaic power prediction of VMD-FE-LSTM considering similar days[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(5): 490-499.
- [25] 梁宏涛, 王莹, 刘国柱, 等. 光伏出力预测理论与方法综述[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(2): 147-158.
LIANG Hongtao, WANG Ying, LIU Guozhu, et al. Review on the theory and methods of photovoltaic output forecasting[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 45(2): 147-158.
- [26] 高漪, 周瑜, 张安龙, 等. 整县光伏下基于个性化联邦学习的光伏出力及负荷功率预测[J]. *电网技术*, 2023, 47(11): 4629-4638.
GAO Yi, ZHOU Yu, ZHANG Anlong, et al. Personalized

- federated learning framework for countywide PV generation and load forecasting[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(11): 4629-4638.
- [27] 王林, 孔小民, 周忠玉, 等. 云储能模式下的配电网分布式光伏-储能无功优化方法[J]. *综合智慧能源*, 2024, 46(6): 44-53.
WANG Lin, KONG Xiaomin, ZHOU Zhongyu, et al. Distributed photovoltaic-energy storage reactive power optimization method for distribution networks under cloud energy storage mode[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2024, 46(6): 44-53.
- [28] 李晖, 梁福波, 智勇, 等. 新能源场站无功电压调相运行技术研究[J]. *智能电网*, 2017, 5(4): 363-366.
LI Hui, LIANG Fubo, ZHI Yong, et al. Research on voltage and reactive power control technology based on inverter in new energy station[J]. *Smart Grid*, 2017, 5(4): 363-366.
- [29] 叶晖, 李爱魁, 张忠. 基于储能的无功补偿技术综述[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(6): 2209-2217.
YE Hui, LI Aikui, ZHANG Zhong. Overview of reactive power compensation technology based on energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(6): 2209-2217.
- [30] 林俐, 马笑寒, 丁文敏. 计及构网型储能电站的新能源基地无功协调优化控制[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(1): 59-68.
LIN Li, MA Xiaohan, DING Wenmin. Coordinated optimal reactive power control of renewable energy base considering grid-forming energy storage station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(1): 59-68.
- [31] 黄永红, 王玉祥, 孔维健, 等. 基于改进凸内逼近法的主动配电网有功-无功协调优化[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(14): 5528-5538.
HUANG Yonghong, WANG Yuxiang, KONG Weijian, et al. Active-reactive power coordinated optimization of active distribution network based on improved convex inner approximation method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(14): 5528-5538.

作者简介:



张阳

张阳(2000), 男, 硕士, 研究方向为新型电力系统优化控制等(E-mail: 13127130173@163.com);

李佳朋(1994), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为新型电力系统优化控制等;

张伟(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 从事新能源发电与电力系统相关工作。

Reactive power optimization method for 100% renewable energy power systems considering energy storage control

ZHANG Yang¹, LI Jiapeng¹, ZHANG Wei², WU Haiyan³, ZHANG Jingyi¹, LI Yujun¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010010, China; 3. Inner Mongolia Electric Power Research Institute Branch, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China)

Abstract: This paper addresses issues of large power fluctuations and low voltage levels in 100% renewable energy power systems without synchronous power support. The control mechanism of energy storage converters is analyzed, and a reactive power optimization model is established, considering energy storage control and DC transmission characteristics. A reactive power optimization method based on energy storage converter control is proposed. This method utilizes energy storage converter control to optimize the system's reactive power, enhancing the voltage regulation capability while participating in active power balance and ensuring economical operation. Additionally, a mathematical model based on DC channel operational characteristics is established to meet the demands for DC transmission in renewable energy systems. The optimization results can be applied to DC transmission curve planning. Finally, a case study is conducted on a county-level power grid in Northwest China without synchronous power support. The active and reactive power decision variables at each node in the grid are solved using the Yalmip platform in MATLAB, verifying the effectiveness of the proposed method.

Keywords: renewable energy power system; energy storage control; reactive power optimization; voltage support; DC transmission; economical operation

(编辑 吴昊)