

基于解析法的高比例可再生能源系统惯量支撑储能配置

李志军^{1,2} 郭燕龙^{1,2} 苗庆玉^{1,2}

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学),天津 300130;
2. 河北工业大学 电气工程学院,天津 300130)

摘要: 高比例可再生能源系统需要适宜的储能平抑其不确定性,但现有储能配置方法大多依赖于离线或仿真计算技术,计算成本较高、效率低,难以满足复杂多变新型电力系统实时调度的需求。针对这一问题,提出了一种新型的基于解析法的系统惯量支撑储能配置方法。建立了系统等效负荷概率分布模型用于求解传统机组期望发电量及同步概率,同时建立了以风电场为代表的可再生能源同步概率模型,实现了可再生能源和传统发电机组对系统惯量不确定性影响的充分表征,在此基础上求解了系统期望惯量;根据 RoCoF 约束求解需求惯量,并根据系统惯量的缺失值设计实现了储能功率配置,在保证系统 RoCoF 指标的基础上提升了计算效能。在 IEEE 39 节点系统中所提方法进行了验证,结果表明了所提方法的有效性。

关键词: 储能配置;解析法;虚拟惯量;概率分布

DOI: 10.19753/j.issn1001-4390.2023.11.002

中图分类号: TM761

文献标识码: A

文章编号: 1001-4390(2023)11-0011-08

High proportion of renewable energy storage system for inertial support energy storage configuration based on analytical method

Li Zhijun¹, Guo Yanlong^{1,2}, Miao Qingyu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China. 2. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A high proportion of renewable energy system needs appropriate energy storage to reduce its uncertainty, however, most of the existing energy storage configuration methods rely on off-line or simulation technology, which has the shortcomings of high calculation cost and low efficiency, and is difficult to meet the real-time scheduling requirements of complex and variable novel power system. To solve this problem, a new system inertia support energy storage configuration method based on analytical method is proposed. In order to fully represent the uncertain effects of renewable energy and traditional generators on system inertia, the system equivalent probability distribution model is established, to solve the expected power generation and synchronization probability of traditional generators. Synchronization probability model of renewable energy represented by wind farm is established. Expected inertia of system is solved on this basis. The demand inertia is solved according to RoCoF constraints, and the energy storage configuration is designed and realized through the missing value of the system inertia. The proposed method is verified in an IEEE 39 node system, results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: energy storage configuration, analytical method, virtual inertia, probability distribution

0 引言

随着化石能源的枯竭和人类生存环境的日益恶化,人们越来越多地将目光投向可再生能源。可再生能源大多通过电力电子接口与电网相连,通常惯量较低^[1],这使得含高比例可再生能源的新型电力系统呈现低惯量的特征。较低的惯量水平使得系统的动态频率支撑能力被大幅削弱^[2],当系统发生功率波动或机

组停运等扰动时,初始频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)和最大频率偏差显著增大,严重时,会触发低频减载(under frequency load shedding, UFLS)等保护机制,甚至引发大面积停电等重大事故^[3],对电力系统的经济和安全运行造成严重威胁。

为应对新型电力系统惯量降低带来的问题,文献[4]提出了一种控制算法,根据系统的实时频率来调整可再生能源的输出,缓解因系统惯量下降带来的频率波动。文献[5-6]提出了虚拟惯量的概念,通过虚拟同

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U20A201284)

步机(virtual synchronous generator, VSG)控制算法模拟同步机组的机电暂态特性,使得交直流变流器的输入输出特性接近于传统的同步发电机,有效提升了系统惯量。在可再生能源发电系统中,基于附加控制算法实现虚拟惯量的方法通常需要牺牲其发电经济效益来实现,且受制于有限的降载能量,所虚拟的惯量通常不能满足系统需要。储能系统(energy storage system, ESS)拥有启停灵活、响应快速的特点,近年来,已被广泛地用作 VSG 和其他虚拟惯量控制技术的能量源,通过合理的配置,即可为系统提供所需的惯量。由于成本等问题,需要根据系统的实时惯量值判断 ESS 是否需要投入,以及投入的功率值,这不仅涉及 ESS 配置问题,也是 ESS 惯量支撑后续控制等问题的基础。文章将对基于系统惯量支撑需求的 ESS 配置问题开展研究。

国内外学者对 ESS 配置问题已进行了大量研究,早期的 ESS 配置,大部分是基于仿真技术开展的。针对惯量支撑的 ESS 配置,文献[7]在 MATLAB/Simulink 中搭建了 ESS-VSG 模型,通过仿真法分析系统受到负荷阶跃扰动时对 ESS 的响应需求,对 ESS 进行了配置。文献[8]针对火电机组调频死区和响应速度问题,通过建模仿真方法,为辅助火电机组惯量响应的 ESS 做出了合理配置。文献[9]则通过对 WSCC(western system coordinating council, WSCC)9 节点测试系统进行负荷扰动下的潮流计算,实现了 ESS 的配置。文献[10]使用蒙特卡洛仿真对高光伏渗透率下的电力系统进行了 ESS 配置,提升了整个系统的频率支撑能力。上述基于系统惯量支撑的 ESS 配置均完全依赖于仿真计算技术,在系统较复杂时需要花费大量的时间,计算成本较高,也无法满足基于惯量在线配置 ESS、优化 ESS 控制等实时应用的场景。

与仿真方法相比,解析法有着计算量小的显著优点,能够通过给出问题求解的显式表达式,更加直观地描述问题的解决思路,明确其物理意义^[11]。另外,解析法可以通过给出近似解作为实时调度问题的基本框架^[12],从而解决仿真法难以独立完成的问题。近年来,解析法在电磁场建模、潮流计算、可靠性评估等研究领域应用广泛。针对于 ESS 配置问题,文献[13-14]使用解析法对基于系统惯量支撑和一次调频的 ESS 做出了配置,并分析了不同可再生能源渗透率下 ESS 对于频率响应的贡献,但该文章使用各发电机组的加权惯量来表示系统的等效惯量,没有考虑传统机组的停运及可再生能源的波动等因素,无法客观地表达出高比例可再生能源系统中各种不确定性因素对系统惯量的影响。

针对上述问题,文章综合考虑了可再生能源及传统发电机组不确定性变化对系统惯量的影响,建立了传统机组的同步概率模型,以风电场为代表建立了可再生能源的同步概率模型,并以此为依据通过解析法

求解系统期望惯量作为系统的实时惯量;以 RoCoF 指标为约束,根据摇摆方程求解系统的需求惯量,在系统惯量不足时配置 ESS 以保证系统频率稳定;最后,通过算例分析表明了所提方法能够满足系统惯量对 ESS 的需求,且极大地提升了计算效率,为 ESS 实时调配技术方案的实现提供了可能。

1 基于解析法的系统惯量建模

1.1 解析法系统惯量建模概述

基于惯量支撑的 ESS 配置以系统实时惯量为配置依据,为此,首先要对系统惯量进行建模。为客观反映机组运行时不确定因素的影响,此节对传统机组和可再生能源的同步概率分别进行建模,作为系统惯量求解的基础。

新型电力系统的系统惯量通常由可再生能源单元等效惯量和传统机组单元惯量构成,可再生能源出力具有随机性,同时也增加了传统机组投切的随机性,两者的随机特性使得系统惯量具有不确定性。另外,考虑到各发电单元只有在与系统并列同步运行的情况下才能为系统提供惯量,因此通过求解各发电单元的同步概率,即可客观的表达出不确定性影响因素下的系统惯量。

利用解析法求解系统惯量的示意图如图 1 所示。求解过程主要分为三个部分,首先对传统机组的同步概率进行求解,为此需要对系统停运容量、等效负荷进行建模,进而对传统机组期望发电量进行求解;其次,对可再生能源的同步概率进行求解,不同于传统机组,可再生能源同步概率的求解借助于其置信度来实现;最后,根据所有发电单元(包含传统机组和可再生能源)的同步概率及对应的惯量来对系统的实时惯量进行求解。

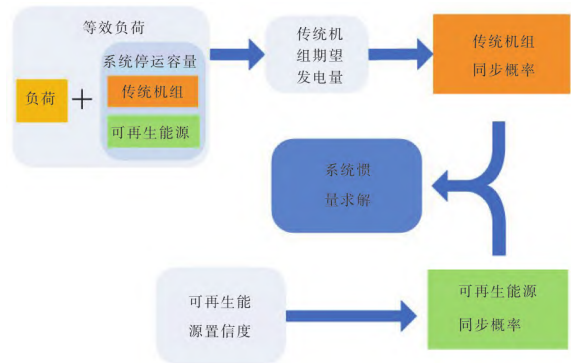


图 1 解析法系统惯量求解示意图

Fig. 1 Analytical solution schematic of system inertia

1.2 传统机组同步概率模型

由图 1 可知,传统机组同步概率的求解包括系统等效负荷的建立、传统机组期望发电量的求解和传统机组同步概率的最终求解,此节将对整个过程依次进行建模和求解。

1.2.1 等效负荷模型

1) 停运容量模型。

等效负荷由系统停运容量和负荷组成,此节首先对系统停运容量进行建模。由于传统机组期望发电量的求解需要借助于系统内所有发电单元的运行情况,所以系统停运容量是包含传统机组和可再生能源在内的全部发电单元的停运容量。

(a) 停运容量概率分布。

文章使用系统的等效惯性时间常数来表征系统惯量的大小^[15]。在不考虑发电单元停运问题时,系统的等效惯性时间常数 H_r 可用各发电单元惯量时间常数的容量加权和表示为:

$$H_r = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_i}{S_{sys}} \quad (1)$$

式中 H_i 和 S_i 分别为发电单元 i 的惯性时间常数和额定容量; S_{sys} 为系统总装机容量。

由于各发电单元随机停运的影响,式(1)不再适用,为此需要对各发电单元的停运情况进行建模。一般情况下,当向原有系统中加入容量为 C_a 、停运概率为 q_a 的二状态(即运行和停运两种状态)新机组时,所有发电单元的停运容量累积概率分布函数 $F_+(C)$ 可用式(2)所示的卷积过程^[16]表示。

$$F_+(C) = F(C)(1 - q_a) + F(C - C_a)q_a \quad (2)$$

式中 $F(C)$ 为加入新机组之前的停运容量概率分布函数。传统机组大多可用二状态模型表示。

可再生能源的停运容量模型一般为多状态形式,因此,若新投入可再生能源 $F_+(C)$ 将表示为:

$$F_+(C) = \sum_{i=1}^n p_i F(C - C_i) \quad (3)$$

式中 p_i 为总状态数为 n 的机组状态为 i 的概率; C_i 为机组状态为 i 时相对于其额定容量所缺失的容量。

通过将系统中所有传统机组的停运容量参数依次代入式(2),可再生能源的停运容量参数依次代入式(3),即可得到系统的停运容量概率分布。

(b) 停运容量参数求解。

对于传统机组,式(2)中的 q_a 、 C_a 可通过停运容量概率表(capacity outage probability table, COPT)或直接查找各机组的停运容量数据得到。对于可再生能源,式(3)中的 p_i 、 C_i 并不能直接获得,为此,此节对以风电场为代表的可再生能源进行建模,并对多状态模型的 p_i 和 C_i 值进行求解。

风电场的运行状态取决于风速及风电场中各风力机的停运情况,使用马尔科夫链可将风速近似等效为离散的有限状态^[17],通过对大量时间序列下的风速样本进行处理,可得到各个风速状态的概率估计值。风速状态对应的概率可用式(4)表示。

$$p_{ws\ k} = \frac{\sum_{j=1}^N n_{kj}}{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N n_{kj}} \quad (4)$$

式中 $p_{ws\ k}$ 表示风速状态为 k 时的概率; N 为风速总的状态数; n_{kj} 为从状态 k 向状态 j 转变的状态个数。根据风速-功率曲线,可得到单个风力机在对应风速状态下的输出功率。

假设风速共有 N 个状态,风电场中共有 m 个风力机,则同一时刻风力机的停运个数 g 为 $0 \sim m$,风电场所有的状态数为 $N \times (m + 1)$,图 2 表示了风电场所有的状态及对应的停运容量。

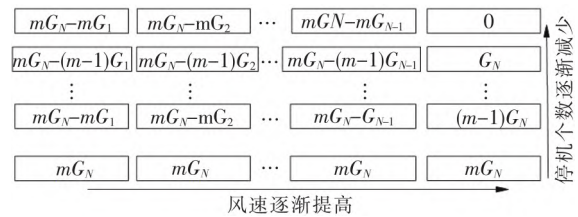


图 2 风电场状态及对应的停运容量

Fig. 2 States of wind farm and relevant capacity outage

当风速达到或超过临界值时,风力机达到其额定功率 G_N ,若某时刻风速状态为 k ,且有 g 个风力机停运,则此时风电场的停运容量 $C_{k\ g}$ 为:

$$C_{k\ g} = mG_N - (m - g)G_k \quad (5)$$

式中 G_k 为风速状态为 k 时风力机的输出功率。则 $C_{k\ g}$ 所对应的停运容量概率 $p_{k\ g}$ 为:

$$p_{k\ g} = C_m^g (1 - q_d)^{m-g} q_d^g p_{ws\ k} \quad (6)$$

式中 q_d 为风力机停运概率; C_m^g 为组合数, $(1 - q_d)^{m-g}$ 、 q_d^g 中的上标均为幂指数。式(6)中的 $p_{k\ g}$ 和式(5)中的 $C_{k\ g}$ 分别对应式(3)中的 p_i 、 C_i 。

2) 等效负荷概率分布。

电力系统稳定运行时,发电单元的停运会影响自身及其他发电单元的发电量^[16]。为了对此影响结果进行合理表达,此节将负荷概率分布与(1)节中所建立的系统停运容量模型结合,即等效负荷模型,作为后文期望发电量求解的基础。

如式(7)所示,系统等效负荷 L_e 为系统总负荷值 L 与发电单元总停运容量值 C 之和。

$$L_e = L + C \quad (7)$$

通过将 L_e 的各部分之间进行卷积,可得到系统等效负荷 L_e 的概率分布函数 $F(L_e)$ ^[15]。其中 L 的概率分布可由负荷数据得到,文章通过对小时级负荷数据进行分析得到所研究时间范围内的负荷概率分布函数 $F(L)$ 。当负荷为 L_i 时,对应的概率分布函数 $F_T(L_i)$ 可表示为^[16]:

$$\begin{cases} F_T(L_i) = P\{L \geq L_i\} \\ P\{L \geq L_i\} = \frac{t_{L \geq L_i}}{t_{total}} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $t_{L \geq L_i}$ 为负荷值大于 L_i 的时间, t_{total} 为总时间。

将负荷概率分布函数 $F(L)$ 作为式 (2) 中 $F(C)$ 的初始概率分布, 并使用 1 节中的方法对所有发电单元的停运容量依次进行卷积运算, 最终可得到包含负荷与系统中所有发电单元停运容量的等效负荷概率分布函数 $F_n(L_e)$ 。

此节中的概率分布函数 $F(L)$ 和 $F_n(L_e)$ 不同于一般意义上的累积概率分布, 表示的是所研究数据中大于某个数值的部分所对应的概率, 这样表达是为了更好地求解机组的期望发电量。

1.2.2 传统机组期望发电量求解

在得到等效负荷概率分布函数 $F_n(L_e)$ 之后, 按照传统机组的优先级对 $F_n(L_e)$ 相继解卷积^[15], 以分别得到包含不同传统机组的等效负荷概率分布曲线。例如首先根据机组 n 的参数对 $F_n(L_e)$ 进行解卷积, 如式 (9) 所示。

$$F_{n-1}(L_e) = \frac{F_n(L_e) - q_n F_{n-1}(L_e - C_n)}{1 - q_n} \quad (9)$$

式中 $F_{n-1}(L_e)$ 为包含除机组 n 外的 $n-1$ 个机组的等效负荷概率分布函数; q_n 为机组 n 的停运概率, 对应式 (2) 中的 q_a 。机组 n 的发电容量 S_n 和期望发电量 E_n 则可表示为:

$$S_n = \int_{P_{n-1}}^{P_n} F_{n-1}(L_e) d(L_e) \quad (10)$$

$$E_n = t \int_{P_{n-1}}^{P_n} (1 - q_n) F_{n-1}(L_e) d(L_e) = t(1 - q_n) S_n \quad (11)$$

式中 t 为所研究的时间范围。

根据传统机组参数对 $F_n(L_e)$ 依次进行解卷积以得到包含 $n-1, n-2, \dots, 1, 0$ 个传统机组, 即分别移除 $1, 2, \dots, n-1, n$ 个机组的等效负荷概率分布函数。将所得的概率分布函数分别代入式 (11) 进行运算, 最终可得到各传统机组的期望发电量。图 3 表示了上述解卷积过程以及 S_n 对应的区域。

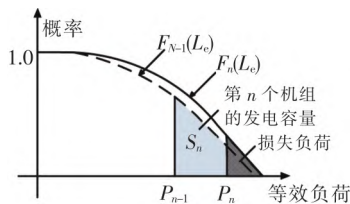


图 3 第 n 个发电机组的发电量概率分布情况
Fig. 3 Probability distribution of energy generated by the n generator unit

1.2.3 传统机组同步概率求解

在得到传统机组的期望发电量后, 即可对其同步概率进行求解。

在给定的时间段内, 发电单元的期望发电量与其发电能力之比即为此发电单元的同步概率, 如式 (12) 所示。将求得的传统机组期望发电量依次代入式 (12), 可得到所有传统机组的同步概率。

$$p_{sn} = \frac{E_n}{S_n t} \quad (12)$$

式中 p_{sn} 为机组 n 在给定时间内的同步概率; S_n 为机组 n 的发电容量。

1.3 可再生能源同步概率模型

对于可再生能源的同步概率模型, 此节同样以风力发电作为典型代表开展相关研究。风电场通过电力电子接口并网, 通常不能为系统提供惯量支撑, 但是通过一定的控制技术可使其具有虚拟惯量。与传统机组不同, 风电场的同步概率主要受其自身功率输出能力的影响, 因此, 利用风电场置信容量 CV 和容量置信度 α 可对其同步概率做出合理表征^[18]。

风电场置信容量 CV 的定义是在维持系统可靠性不变的基础上, 系统因发电单元的增加而相应可提升的负荷值。设 P_w 为此负荷值, G_w 为风电场装机容量, 则 α 为 CV 与 G_w 的比值, 即:

$$CV = P_w \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{CV}{G_w} \quad (14)$$

若所研究的时间范围为 t , 则负荷吸收的能量 E_1 为:

$$E_1 = P_w t \quad (15)$$

同时, 此能量值也是风电场的期望发电量 E_w 。风电场的同步概率 p_{sw} 可以表示为:

$$p_{sw} = \frac{E_w}{G_w t} = \frac{P_w t}{G_w t} = \frac{P_w}{G_w} \quad (16)$$

将式 (13) 代入式 (16) 并与式 (14) 比较可知, 风电场的同步概率与 α 的值完全相等, 即可用式 (17) 来求解风电场的同步概率。

$$p_{sw} = \frac{CV_w}{G_w} \quad (17)$$

1.4 系统实时惯量的解析模型

在任意时刻, 系统惯量的可能值可表示为:

$$h = \frac{\sum_{n \in U} H_n S_n}{S_{\text{sys}}} \quad (18)$$

式中 U 为处于同步状态的发电单元集; H_n 和 S_n 为发电单元的惯性时间常数和额定容量; h 为此时刻的系统惯量值。

由于各发电单元同步状态的不确定性, 导致 h 会随着各发电单元状态的变换而变化。为此, 需要对各 h 值对应的概率进行求解, 其表达式为:

$$P\{H_t = h\} = \prod_{\substack{n \in U \\ j \in D}} p_{sn} q_{sj} \quad (19)$$

式中 $P\{H_r = h\}$ 为系统惯量等于 h 的概率; p_{sn} 为发电单元 n 的同步概率, 对应 1.2 和 1.3 节中的 p_{sn} 和 p_{sw} ; $q_{sj} = 1 - p_{sj}$; D 为处于非同步状态的发电单元集。

系统期望惯量 $E[H_r]$ 即为 h 的期望, 可表示为:

$$E[H_r] = \sum_{h \in H_r} hP\{H_r = h\} \quad (20)$$

文章将 $E[H_r]$ 作为系统的实时惯量, 以体现系统中的不确定性因素对系统惯量的影响。

2 基于惯量支撑的解析法 ESS 配置

图 4 为利用解析法进行惯量支撑 ESS 配置的示意图, 主要由传统机组、可再生能源、负荷及 ESS 构成。第 1 章已经建立了系统实时惯量模型, 对应图 4 中的 H_r , 为完成解析法 ESS 配置, 还需要得到系统需求惯量 H_{min} (即满足 RoCoF 约束下的系统惯量最小值), 根据系统惯量的缺失值来对 ESS 的投入与否做出判断并计算 ESS 配置功率。

2.1 系统需求惯量解析模型

当系统发生功率扰动 ΔP 后, 初始时刻的频率的变化可用式 (21) 所示的摇摆方程表示^[19]。

$$\frac{2H_{min}}{f_s} \frac{df}{dt} = \frac{P_m - P_e}{S_{sys}} = \frac{\Delta P}{S_{sys}} \quad (21)$$

式中 $\frac{df}{dt}$ 即 RoCoF, 被定义为在发生功率扰动的后频率变化率; f_s 为系统初始频率; P_m 和 P_e 分别为系统等值机械功率和电磁功率。

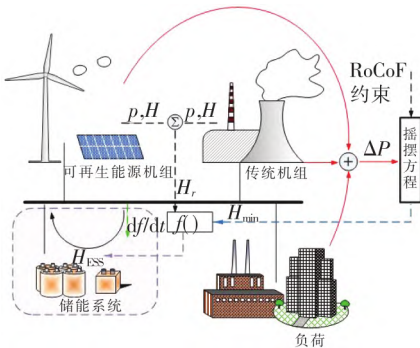


图 4 考虑惯量支撑需求的解析法 ESS 配置示意图
Fig. 4 Analytical ESS configuration schematic considering inertia support demand

由此可得:

$$H_{min} = \Delta P \frac{f_s}{2S_{sys}} / \frac{df}{dt} \quad (22)$$

初始 RoCoF 根据不平衡事件突发后的 0.5 s 内的频率变化计算得到^[20], 其影响因素包括扰动大小、系统实时惯量、系统频率响应速度等。如果初始 RoCoF 过大, 会导致系统频率下降超过允许值, 触发 UFLS。为此, 需要将初始 RoCoF 限定在避免触发 UFLS 的允许范围内。文中取系统 RoCoF 的约束值为 0.5 Hz/s^[20], 同

时将此极端情况作为 ESS 配置的依据。

2.2 ESS 投入功率

根据 2.1 节的模型可得到系统发生功率扰动时, RoCoF 约束下的系统惯量需求 H_{min} , 将 1.4 节中得到的系统期望惯量作为任意时刻 t 下的实时系统惯量 $H_{sys}(t)$ 。若 $H_{sys}(t) < H_{min}$, 则 ESS 需要投入运行以提供虚拟惯量, 维持系统频率稳定。在任意时刻 ESS 需要向系统提供的惯量 H_{ESS} 为:

$$H_{ESS}(t) = H_{min} - H_{sys}(t) \quad (23)$$

惯量为 H_{ESS} 的 ESS 在对频率变化做出惯量支撑时, 其输出功率在虚拟同步机控制模式下同样可根据式 (21) 所示的摇摆方程进行求解, 将式 (21) 中的 H_{min} 使用 H_{ESS} 代替, 解得 ESS 的投入功率 P_{ESS} 为:

$$P_{ESS} = H_{ESS} \frac{2}{f_s} \frac{df}{dt} \quad (24)$$

综上, 基于解析法的系统惯量支撑需求 ESS 配置总流程如图 5 所示。

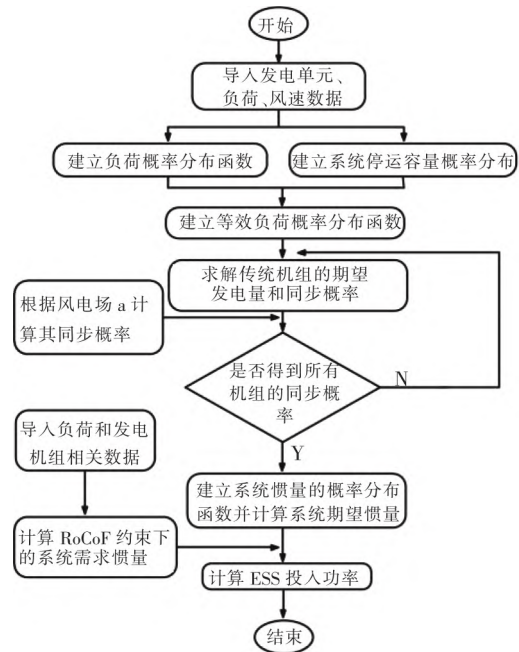


图 5 基于解析法的惯量支撑 ESS 配置流程图
Fig. 5 ESS configuration flow chart for inertia support based on analytical method

3 算例分析

文章使用新英格兰 IEEE 39 节点系统的数据来验证所提方法的有效性。该系统包含 39 个节点、10 个发电机组以及 46 条传输线路, 其单线图如图 6 所示。根据场景的不同, 将其中的部分发电机组替换为风电场来表示可再生能源的接入对系统惯量的影响。使用美国国家可再生能源实验室战略能源分析中心的风速数据来对 1.3 节中所描述的风电场进行建模^[21]。风电场的容量置信度和同步概率取值为 0.15^[22]。引用我国

北方某地区的年度小时级负荷数据,并根据算例系统中的峰值负荷来对负荷数据等比例缩放,以此建立负荷曲线。引用文献[23]中的发电机组停运容量及概率值来建立等效负荷概率分布,风电场的惯量值引用自文献[24]。

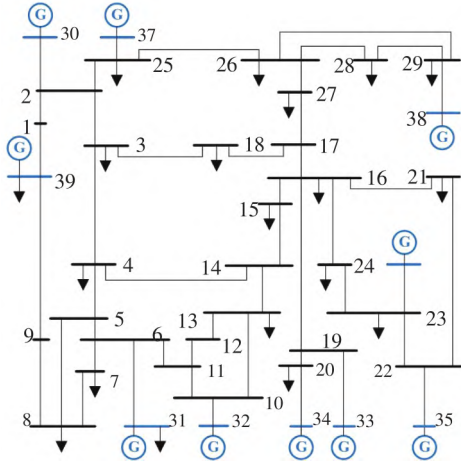


图 6 IEEE 39 节点系统单线图

Fig. 6 Single line diagram of IEEE 39 bus system

3.1 算例介绍

使用四个具有不同风电渗透率的算例来验证文章所提 ESS 解析配置方法的有效性。在四个算例中,均设置 0.1 p. u. 的功率突变来求解系统的需求惯量。此外,文中所提方法适用于任意风电渗透率、负荷扰动限制下的 ESS 配置求解,在实际工程中可根据实际情况灵活选择以上参数。

- 1) 算例 1: 所有发电机组均为原系统中的传统同步发电机组,所有机组的有功容量和为 7 120 MW;
- 2) 算例 2: 考虑大约 12.5% 的风电渗透率,使用容量为 550 MW 的风电场来替换原系统中 250 MW 和 650 MW 两个传统机组;
- 3) 算例 3: 考虑大约 28.5% 的风电渗透率,使用容量为 1 600 MW 的风电场来替换原系统中 250 MW、650 MW、632 MW 和 508 MW 四个传统机组;
- 4) 算例 4: 考虑大约 38% 的风电渗透率,使用容量为 2 300 MW 的风电场来替换原系统中 250 MW、650 MW、632 MW、508 MW 和 650 MW 五个传统机组。

3.2 传统机组同步概率和系统期望惯量

算例 1 依据 1.2.2 节理论对包含所有发电机组的等效负荷概率分布曲线依次进行解卷积,最终得到了各机组依次被移除时等效负荷的变化情况。当所有发电机组均被移除时,等效负荷即为实际负荷,等效负荷概率分布曲线与负荷概率分布曲线重合。各等效负荷概率分布曲线如图 7 所示。将所得等效负荷概率分布曲线对应的函数依次代入式(11)和式(12),最终得到了各发电机组的期望发电量和同步概率,结果如表 1

所示。图 8 为系统惯量累积分布曲线,其中,惯量的取值范围为 0—4.824 s,最终解得系统期望惯量 $E[H_r]$ 为 3.320 s。

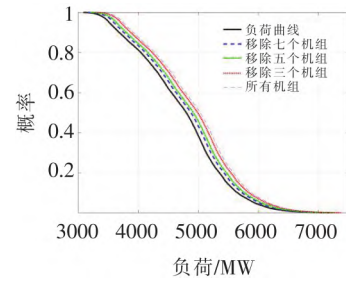


图 7 算例 1 等效负荷概率分布曲线

Fig. 7 Probability distribution curve of equivalent load of case 1

表 1 算例 1 各机组的期望发电量和同步概率

Tab. 1 Expected power generation and probability of synchronization of case 1

机组节点	额定功率/MW	年期望发电量/(MW·h)	同步概率/%
30	250	8 979	0.41
32	650	128 115	2.25
33	632	607 334.304	10.97
34	508	1 219 321.92	27.4
35	650	3 007 570.8	52.82
36	560	3 694 407.36	75.31
37	540	4 262 090.4	90.1
38	830	6 963 972.24	95.78
39	1 000	8 515 596	97.21
31	1 500	11 195 280	85.2

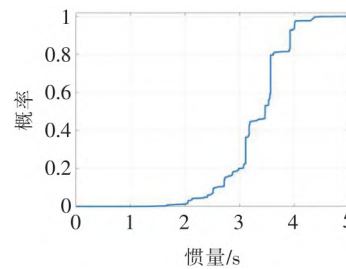


图 8 算例 1 系统惯量累积分布曲线

Fig. 8 Cumulative distribution curve of system inertia of case 1

由于风电场的渗透,算例 2 ~ 算例 4 的系统惯量的取值范围分别为 0—4.399 s、0—3.703 s 和 0—3.269 s,系统期望惯量分别为 3.236 s、3.017 s 和 2.762 s。

为了验证文章所提解析方法的有效性,使用了文献[10]中的蒙特卡洛仿真方法来对系统惯量进行求解,最终求得的四个算例中的系统惯量分别为 3.399 s、3.313 s、3.089 s 和 2.813 s,与解析法的求解结果误差均在 3% 以内。

3.3 ESS 配置结果

根据第 2 章所提方法来计算 ESS 需求惯量和投入功率值,其结果如表 2 所示。结果表明,在规定的 RoCoF 约束下,对于算例 1 和算例 2,系统本身具有足够的惯量。随着风电渗透率的提高,在算例 3 和算例 4 中,需要调度并投入相应的 ESS 来为系统提供更多的虚拟惯量。与之相对应,表 3 给出了蒙特卡洛仿真法的 ESS 配置结果,所提解析法与仿真法所得结果中,ESS 均在算例 1 和算例 2 中不投入使用,在算例 3 和算例 4 中投入使用,且 ESS 配置误差均在 5% 以内。

表 2 解析法的 ESS 配置结果

Tab. 2 ESS configuration result of analytical method

算例	$E[H_r]/s$	H_{min}/s	H_{ESS}/s	P_{ESS}/MW
1	3.320	3.195	N/A	N/A
2	3.239	3.195	N/A	N/A
3	3.017	3.195	0.178	40.1
4	2.762	3.195	0.433	97.6

表 3 仿真法的 ESS 配置结果

Tab. 3 ESS configuration result of simulation method

算例	$E[H_r]/s$	H_{min}/s	H_{ESS}/s	P_{ESS}/MW
1	3.399	3.261	N/A	N/A
2	3.313	3.261	N/A	N/A
3	3.089	3.261	0.172	38.7
4	2.813	3.261	0.448	100.9

文中算例中所使用的计算机处理器为 i5-6600,软件为 MATLAB2018a。整个 ESS 配置过程,解析法耗时约 0.78 s,仿真法耗时数十分钟,表明在考虑随机特性的惯量求解和 ESS 配置实时性应用场景中,解析法具有良好的实时匹配能力。

通过以上的分析以及与模拟仿真结果的对比,表明了所提 ESS 解析配置方法能够在保证计算结果准确性的基础上较大地提高计算速度和效能。

3.4 ESS 配置效果

3.4.1 ESS 配置的动态频率支撑效果

为了验证所提 ESS 配置方法的动态频率支撑效果,分别将算例 1~算例 4 的 ESS 配置结果代入 IEEE 39 节点系统中,分析当系统遭受 0.1 p.u. 的负荷波动的情况下的初始 RoCoF 的变化情况并与无 ESS 配置下的系统进行对比,其结果如表 4 所示。由表 4 中数据可知,算例 3 和算例 4 在 ESS 配置前后,其初始 RoCoF 均由不合格转变为合格状态,且配置 ESS 后的初始 RoCoF 接近于约束值,既保证了支撑效果,也避免了 ESS 的过度配置。

此外,算例 1 和算例 2 在无 ESS 配置的情况下即可满足 RoCoF 的要求,这也验证了所提方法对于系统需求惯量计算的准确性。

表 4 ESS 配置前后 RoCoF 对比

Tab. 4 RoCoF comparison before and after

算例	ESS configuration			
	1	2	3	4
无 ESS	0.481	0.493	0.530	0.578
有 ESS	N/A	N/A	0.498	0.499

3.4.2 ESS 的实时在线配置效果

为了验证所提方法的实时在线配置效果,在 2 s、15 s 和 30 s 时分别将系统的参数由算例 1 更改为算例 2~算例 4 所对应的参数,并于 1 s 后产生 0.1 p.u. 的功率扰动,分析其初始 RoCoF 的变化情况,并与离线配置的结果相比较,其结果如表 5 所示。

表 5 ESS 实时在线配置效果

Tab. 5 Effect of online ESS configuration

算例	1	2	3	4
离线	0.481	0.493	0.530	0.578
在线	0.481	0.493	0.498	0.499

由数据可知,在系统状态为算例 1 和算例 2 对应参数时,由于系统本身惯量能够满足标准要求,故离线配置和在线配置中 ESS 均未投入使用。当系统状态变为算例 3 和算例 4 对应参数时,由于离线配置计算时间较长,无法根据系统最新状态对 ESS 配置做出改变,故 ESS 未能及时投入,初始 RoCoF 超过了约束值。而所提方法能够较好地感知系统参数的变化,并据此实时调整 ESS 配置,使得初始 RoCoF 仍满足系统要求。

以上分析表明了所提方法能够实现 ESS 实时在线配置的可行性和有效性。

4 结束语

高比例可再生能源电力系统拓扑复杂多变,使得系统频率特性具有强烈的不确定性特点,传统的基于仿真技术的 ESS 配置方法通常计算成本高、效率低,无法满足新型电力系统多变的实时在线配置需求,现有的解析法配置技术无法客观反应出新型电力系统中各种不确定性因素对系统惯量的影响,使得 ESS 配置不够客观、准确。针对这一问题,文章提出了一种新型的基于解析法的 ESS 配置方法,综合考虑了可再生能源和传统机组的不确定性问题,为用于惯量支撑的 ESS 提出了一种新型解析配置方法,经过理论分析和算例验证,主要工作总结和结论如下:

- 1) 使用概率统计的方法建立了系统惯量解析模型,设计实现了基于解析法的 ESS 配置并客观反映了系统不确定性的影响;
- 2) 与传统蒙特卡洛仿真配置方法对比,该解析配置方法不仅能满足 ESS 的准确配置,计算效能也得到了大幅提升;
- 3) 基于所提方法的高效能,使得利用其实现 ESS

实时在线配置成为可能,可满足新型电力系统实时调控的需求。

参 考 文 献

[1] 汪凯琳,许仪勋,潘瑞媛,等. 考虑风光可靠性的微电网混合储能优化配置[J]. 电测与仪表,2023,60(5): 39-44.
Wang Kailin, Xu Yixun, Pan Ruiyuan, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage systems in micro-grid considering wind-solar reliability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 39-44.

[2] 杨旭红,姚凤军,郝鹏飞,等. 基于改进型 RBF 神经网络的 VSG 转动惯量自适应控制[J]. 电测与仪表,2021,58(2): 112-117.
Yang Xuhong, Yao Fengjun, Hao Pengfei, et al. Adaptive inertia control for VSG based on improved RBF neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 112-117.

[3] 孙伟卿,尹向阳,秦艳辉. 基于有效惯量分布的电力系统惯量不足概率评估[J]. 电力自动化设备,2022,42(8): 111-118.
Sun Weiqing, Yin Xiangyang, Qin Yanhui. Probability assessment of power system inertia shortage based on available inertia distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 111-118.

[4] G. Delille, B. Francois, G. Malarange, et al. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia[J]. IEEE Trans. Sustain. Energy, 2012, 3(4): 931-939.

[5] H. Beck, R. Hesse. Virtual synchronous machine[J]. 9th Int. Conf. Elect. Power Qual. Utilization, 2007: 1-6.

[6] Q. Zhong. Virtual synchronous machines: A unified interface for grid integration[J]. IEEE Power Electron. Mag, 2016, 3(4): 18-27.

[7] 张雪菲,孙阔,张章,等. 考虑源荷不确定性与碳减排的复合储能系统优化配置模型[J]. 电测与仪表,2022,59(5): 42-49.
Sun Xuefei, Sun Kuo, Zhang Zhang, et al. An optimal configuration model of composite energy storage system considering source-load uncertainty and carbon emission reduction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 42-49.

[8] 罗耀东,田立军,王焱,等. 飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J]. 电力系统自动化,2022,46(9): 71-82.
Luo Yaodong, Tian Lijun, Wang Yao, et al. Coordinated control strategy and optimal capacity configuration of flywheel energy storage participating in primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 71-82.

[9] Yue Meng, Wang Xiaoyu. Grid inertial response-based probabilistic determination of energy storage system capacity under high solar penetration[J]. IEEE Trans. Sustain. Energy, 2015, 6(3): 1039-1049.

[10] A. Bera, M. Abdelmalak, S. Alzahrani, et al. Sizing of energy storage systems for grid inertial response[J]. IEEE Power & Energy Soc. Gen. Meeting, 2020: 1-5.

[11] K. H. Shin, J. Y. Choi. Electromagnetic Analysis of single-phase linear oscillatory actuator based on subdomain analytical model with end and stacking effects[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 1-5.

[12] 朱杰. 永磁电机磁场解析法建模及计算[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Zhu Jie. Analytical modeling and calculation of magnetic fields in permanent-magnet machine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[13] V. Knap, S. K. Chaudhary, D. -I. Stroe, et al. Sizing of an energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve

[J]. IEEE Trans. Power Syst, 2016, 31(5): 3447-3456.

[14] 刘洪波,张崇,孙同,等. 高风电渗透率下考虑电网频率支撑需求的储能系统配置方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 36-43.
Liu Hongbo, Zhang Chong, Sun Tong, et al. Configuration method of energy storage system considering grid frequency support demand under high wind power penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 36-43.

[15] 秦毅,刘国海. 基于惯量响应支撑功率的电力系统一次调频功率估算[J]. 电测与仪表,2022,59(4): 79-83.
Qin Yi, Liu Guohai. Primary frequency power estimation of power system based on inertia response support power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 79-83.

[16] R. R. Booth. Power system simulation model based on probability analysis[J]. IEEE Trans. Power App. Syst, 1972, 1: 62-69.

[17] 黄越辉,曲凯,李驰,等. 基于 K-means MCMC 算法的中长期风电时间序列建模方法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2469-2476.
Huang Yuehui, Qu Kai, Li Chi, et al. Research on modeling method of medium-and long-term wind power time series based on k-means MCMC algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2469-2476.

[18] L. L. Garver. Effective load carrying capability of generating Units[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, 85(8): 910-919.

[19] H. Ahmadi, H. Ghasemi. Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J]. IEEE Trans. Power Syst, 2014, 29(4): 1536-1545.

[20] Meng Lexuan, Jawwad Zafar, Shafiuzzaman K. Khadem, et al. Fast frequency response from energy storage systems—a review of grid standards, projects and technical issues[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1566-1581.

[21] Innovative Data Energy Applications. The wind prospector[DB/OL]. Available: <https://maps.nrel.gov/wind-prospector>, Mar. 23, 2021.

[22] Y. H. Kim, S. H. Kim, E. H. Kim, et al. The capacity credit of wind power in Korea-Jeju[J]. 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, Korea (South), 2009: 1-4.

[23] North American Electric Reliability Corporation. Generating availability data system (GADS) [DB/OL]. Available: <https://www.nerc.com/pa/RAPA/gads/Pages/Reports.aspx>, Aug. 22, 2020.

[24] N. Nguyen, A. Bera, J. Mitra. Energy storage to improve reliability of wind integrated systems under frequency security constraint[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4039-4047.

作者简介:



李志军(1964—)男,博士,教授,研究方向为新能源发电技术、电力系统稳定与控制技术。
Email: zhijun_li@263.net

郭燕龙(1991—)男,通信作者,硕士研究生,研究方向为储能参与电网调频的控制与分析。Email: 741716167@qq.com
苗庆玉(1999—)男,硕士研究生,研究方向为微电网二次频率控制。Email: 1348928203@qq.com

收稿日期:2023-06-12;修回日期:2023-08-02
(田春雨 编发)