Vol.43 No.7 Jul. 2023

考虑低电压穿越场景的频率稳定约束风电 承载能力量化方法

吴 琛1,花赟玥2,陈可欣2,黄 伟3,谢一工3,高晖胜2

(1. 云南电网有限责任公司电网规划建设研究中心,云南 昆明 650033;

2. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;3. 云南电网有限责任公司电力调度控制中心,云南 昆明 650011)

摘要:具备良好低电压穿越能力的风电机组在故障后有功可逐渐恢复,此过程给系统带来的有功扰动并非阶 跃形式。若在评估电网对此类风电的承载能力时仍考虑阶跃扰动,则评估结果将较为保守。针对此问题,提 出了可用于量化风电低电压穿越过程系统最低点、平均变化率等关键频率特征的系统频率强度指标,并分析 了该指标与系统中风电容量占比的关系。结合该指标和电网对最低点等频率特征的约束,建立了可量化评 估低电压穿越场景下系统风电承载能力的双层优化模型,实现了低电压穿越场景下风电承载能力的精准评 估。此外,为进一步提升风电承载能力,借助频率强度指标量化分析了给定风电占比目标下,风电机组需提 供的最小调频能力。最后,通过仿真验证了所提出的风电承载能力量化方法及提升措施的有效性。

关键词:风电;低电压穿越;有功恢复;非阶跃扰动;频率强度指标;承载能力

中图分类号:TM712;TM614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202212016

0 引言

在新能源电力系统中,双馈风机得到了广泛的 应用,由于其转子转速与电网频率几乎解耦,不具备 同步机一样的惯性,常规控制下无法在系统频率跌落 时提供有功支撑^[1]。当风电渗透率提高,大量风电机 组替代原系统中的同步机组时,会导致系统调频能 力下降,在功率扰动下可能会出现频率失稳的问题。 因此,有必要研究频率稳定约束条件下系统风电最 高渗透率,即承载能力,为实际运行提供理论支撑。

目前,许多文献从频率稳定约束角度对风电承 载能力进行了研究,其中通常将频率最低点和频率 变化率作为频率稳定的判断指标^[24]。当风电渗透 率较高时,系统扰动后的频率变化率和频率最低点 可能会超过频率安全稳定运行的波动范围。文献 [5]以功率扰动期间频率跌落不超过0.5 Hz 为约束 条件,通过仿真分析了新能源满足约束条件的临界 占比。文献[6]以功率扰动后频率稳态偏差不超过 0.2 Hz 为限制,分析得到了新英格兰39节点系统最 大风电接入容量。然而,这些文献大多是通过仿真 来给出一些定性的结论,缺乏定量的频率约束指标

收稿日期:2022-07-03;修回日期:2022-09-30 在线出版日期:2022-12-22

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目 (YNKJXM20210097);云南省重大科技专项计划 (202002AF080001)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (YNKJXM20210097) and the Major Science and Technology Project of Yunnan Province(202002AF080001) 来进行计算。此外,现有的关于风电承载能力的研 究中,几乎都是考虑机组跳闸等因素带来有功阶跃 扰动[7-9]。目前风电并网技术还在发展当中,风电抗 扰能力较弱,故障下容易脱网。此阶段针对阶跃扰 动进行分析是合理的。然而,随着电网中风电占比 逐年提升,对其要求也越来越高。例如,《风电场接 入电网技术规定 第1部分:陆上风电》(后文简称 《规定》)就要求风电按照电压跌落值对无功进行支 撑以保证不脱网运行。研究表明,在风电机组具备 良好的低电压穿越能力后,其发生脱网的事故的概 率较小[10-12]。当并网点电压很低时,具有良好低电 压穿越能力的风电机组会采用无功优先控制,故障 切除后,风电机组有功能逐渐恢复到故障前的稳态 出力值[13-15]。故风电机组低电压穿越给电网带来的 有功扰动及造成的频率波动均显著小于其直接脱 网,此时若考虑故障后风电机组直接脱网来评估系 统的风电承载能力,则结果将较为保守,限制了风电 的进一步接入。

为了分析考虑低电压穿越场景下频率稳定约束 的风电承载能力,本文首先建立了该场景下量化频 率最低点、平均变化率等特征的频率强度指标,分析 了该指标与系统风电容量占比之间的关系。然后, 由电网对最低点等频率特征的要求计算指标临界 值,并基于指标临界值提出了电网中风电承载能力 量化方法。进一步地,提出了利用风电调频定量提 升承载能力的方法。最后通过仿真验证了本文提出 的承载能力量化方法的有效性。

1 频率稳定约束的风电承载能力评估问题

随着风电渗透率的提高,常规机组的发电容量

被替代,导致系统的调频能力下降,系统频率响应特性恶化。若将风电无限制地接入电网中,则势必会带来频率稳定问题。因此有必要研究考虑频率稳定约束条件下的新能源承载能力量化问题。

首先给出风电承载能力的定义。用λ表示系统 中风电容量占比,即:

$$\lambda = S_{\rm w}/S \tag{1}$$

式中:S_w为系统中风电接入的容量;S为系统中所有 发电机组的总容量。则在满足频率稳定约束的前提 下风电容量最大占比即为系统的风电承载能力。通 常,频率稳定约束可由扰动后的最低点、变化率等频 率特征表征,即要求这些特征在电网允许的范围内。

考虑一个含n台发电设备的风电机组并网系统,其中前m台(编号为1—m)为同步机,后n-m台(编号为m+1-n)为风电机组,则系统的频率响应 $\Delta\omega(s)$ 可表示为^[3,4]:

$$\Delta\omega(s) = \frac{\Delta P_{\rm L}(s)}{\sum_{i=1}^{m} S_i G_{i,\rm SG}(s) + \sum_{i=m+1}^{n} S_i G_{i,\rm WTG}(s)}$$
(2)

式中:s为拉普拉斯算子; $\Delta P_{L}(s)$ 为扰动,一般考虑系 统中最严重的扰动; $S_{i}(i=1,2,\cdots,n)$ 为发电设备i的 容量; $G_{i,sc}(s)$ 、 $G_{i,wTC}(s)$ 分别为同步机i和风电机组i的频率-有功功率传递函数,风电机组不参与调频 时, $G_{i,wTC}(s)=0$ 。基于式(2)可获得系统的频率轨迹, 分析频率特征是否满足需求,并判断电力系统是否 可接入更多的风电。

目前,风电机组大多不具备低电压穿越能力或 低电压穿越能力较差,故障后容易因并网点电压过 低而直接脱网,故现有风电承载能力研究中会选择 风电脱网带来的有功阶跃作为扰动进行分析。然 而,随着对风电机组抗干扰要求逐渐提高,风电机组 低电压穿越能力也越来越强,发生直接脱网的概率 也相应降低。例如,在西北"4·17"事故中,有部分完 成低电压穿越改造的风电机组并未脱网^[10];又如,文 献[11]仿真复现某典型风电汇集系统的一次连续脱 网事故,发现离故障点较近的风电场电压大幅跌落, 但具备低电压穿越能力的风电机组并未脱网。

风电脱网时造成的有功扰动为阶跃形式,而其 低电压穿越带来的功率扰动却并非如此。低电压穿 越时,风电一般采用无功优先控制而有功出力受限; 在故障切除后,《规定》要求风电的有功按照一定的 速率逐渐恢复。整个低电压穿越及恢复过程产生的 功率扰动 $\Delta P_{d LVRT}(t)$ 为非阶跃,如式(3)和图1所示。

$$\Delta P_{d_{\text{LVRT}}}(t) = \begin{cases} -P_0 & t_0 \le t < t_1 \\ -P_0 + k(t - t_1) & t_1 \le t \le t_2 \end{cases}$$
(3)

式中:t₀为故障发生时刻,可令t₀=0;t₁为故障切除时 刻;t₂为故障切除后,在故障期间处于低电压穿越状 态的风电机组有功功率完全恢复到故障前出力的时 刻;P₀为故障造成风电机组低电压穿越所带来的功 率缺额, $P_0 = P_{N0}$,其中 P_{N0} 为风电正常运行时的出力值;k为故障切除后风电机组的有功恢复速率。





若忽视故障切除后风电有功恢复过程对频率的 支撑作用,直接利用阶跃扰动下的频率约束指标来 评估系统的风电承载能力,则可能导致评估结果过 于保守。此处给出一个示例,假设某电网对频率最 低点的限值为59.2 Hz。用系统中最大的风电场站 端电压骤降作为扰动分析该电网风电承载能力。若 认为该风电场直接脱网(发生有功阶跃),则按照现 有文献的方法分析可以得到系统风电承载能力为 39%。但若风电具有较强的低电压穿越能力,则此 时系统的频率跌落最大值并未达到临界值0.8 Hz, 见图2。这表明了利用有功阶跃扰动分析得到的风 电承载能力较为保守,系统还能接入更多的风电。







因此,在高风电渗透率系统中,当风电具备良好 的低电压穿越能力时,选择风电低电压穿越造成的 功率非阶跃有功扰动下的频率特征来约束风电承载 能力更为合理。

2 评估承载能力的频率强度指标

本节建立了低电压穿越场景下的频率强度指标,并给出了其与风电容量占比的关系。第3节将 基于此量化系统的风电承载能力。

2.1 低电压穿越场景下频率强度指标

由于频率响应与系统中所有设备相关,阶数较高,最低点、变化率等频率特征难以量化。为此,许 多文献提出了频率响应的简化模型。例如,文献[3] 指出若系统的频率轨迹在功率阶跃扰动后一段时间 内接近阻尼正弦曲线,那么可以采用如式(4)所示的 统一结构模型 *G*_{wi}(s)来近似表征各设备在该时间段 内的频率-有功动态。

$$G_{u,i}(s) = J_{u,i}s + D_{u,i} + \frac{1}{K_{u,i}s}$$
(4)

式中: $J_{u,i}$ 、 $D_{u,i}$ 和1/ $K_{u,i}$ 分别为有效惯量、有效阻尼系数和有效动态调差系数,均为统一结构参数。该模型的推导以及参数求解过程见附录A。基于该简化模型,简化后的系统频率响应 $\Delta\omega_u(s)$ 只有2阶,可表示为:

$$\Delta \omega_{u}(s) = \frac{\Delta P_{L}(s)}{J_{us}s + D_{us} + K_{us}^{-1}s^{-1}}$$
(5)

式中: J_{us} 、 D_{us} 、 K_{us}^{-1} 可以表示为各同步机(下标为SG) 和风电机组(下标为WTG)的统一结构参数之和,如式(6)所示。

$$\begin{cases} J_{us} = \sum_{i=1}^{m} S_i J_{ui, SG} + \sum_{i=m+1}^{n} S_i J_{ui, WTG} \\ D_{us} = \sum_{i=1}^{m} S_i D_{ui, SG} + \sum_{i=m+1}^{n} S_i D_{ui, WTG} \\ K_{us}^{-1} = \sum_{i=1}^{m} S_i K_{ui, SG}^{-1} + \sum_{i=m+1}^{n} S_i K_{ui, WTG}^{-1} \end{cases}$$
(6)

进一步地,根据文献[3-4]中结论,可建立如式 (7)所示的频率跌落深度系数α和坡度系数J₂这2个 频率强度指标,其物理意义分别为单位功率阶跃扰 动下频率最低点和平均频率变化率的倒数。指标越 大,扰动下的频率波动越小。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{e-1}{2} D_{us} + \sqrt{\frac{J_{us}}{K_{us}}} \\ J_{z} = J_{us} [(e-1)\zeta + 1]^{\frac{1}{n_{i}}} \end{cases}$$
(7)

式中: $\zeta = D_{us}/(2\sqrt{J_{us}/K_{us}})$,为系统的阻尼比; n_i 为整数,一般取值为3。文献[3]指出,指标计算的频率特征与仿真结果相比,误差小于5%。

然而,上述方法是针对有功阶跃扰动提出的,不 能直接用于分析式(3)所示的非阶跃扰动。为此,可 将式(2)中频率响应表达式进行等价变换。假设系 统中编号为m+1的风电机组进入低电压穿越,注意 到其功率扰动 $\Delta P_{d_{\perp}VRT}(s)$ 可以分解成一阶跃扰动 $\Delta P_{d_s}(s) = -P_0/s$ 和 $\Delta P_{d_{\perp}}(s) = \Delta P_{d_{\perp}VRT}(s) + P_0/s$ 之和。 若将 $\Delta P_{d_s}(s)$ 视为一等效发电设备的响应并将该设 备的动态用 $G_{eq}(s)$ 表示,则式(2)可以重写为:

$$\Delta\omega(s) = \frac{\Delta P_{d_s}(s)}{\sum_{i=1}^{m} S_i G_{i,SG}(s) + \sum_{i=m+1}^{n} S_i G_{i,WTG}(s) + G_{eq}(s)}$$
(8)

式中: $G_{eq}(s) = -\Delta P_{d_r}(s) / \Delta \omega(s)$,为等效设备的频率-有功传递函数。

式(8)与式(2)频率响应相同,且扰动为阶跃形 式,故可利用式(7)所示的指标来量化式(8)所示系 统的频率强度。需要注意的是,此时计算系统的统 一结构参数(记为 J'_w, D'_w和 K^{'-1})包含了等效设备 $G_{eq}(s)$ 的统一结构参数 $(J_{u,eq}, D_{u,eq} n K_{u,eq}^{-1})$ 。另外,需 注意区分此时的 $J_{us}, D_{us}, K_{us}^{-1}$ (对比式(6))需减去低 电压穿越风电机组等效的部分。故 $J'_{us}, D'_{us} n K'_{us}^{-1}$ 可 表示为:

 $J'_{us}=J_{u,eq}+J_{us}, D'_{us}=D_{u,eq}+D_{us}, K'_{us}=K^{-1}_{u,eq}+K^{-1}_{us}$ (9) 2.2 频率强度指标与风电容量占比间的关系

当风电容量占比变化时,式(7)所示的频率强度 指标也会发生改变。为分析风电承载能力,需计算 不同风电容量占比下的指标,具体方法如下。

设风电容量占比为 λ 时频率强度指标为 $\alpha(\lambda)$ 、 $J_{z}(\lambda)$,可表示为:

$$\begin{cases} \alpha(\lambda) = \frac{e-1}{2} D'_{us}(\lambda) + \sqrt{J'_{us}(\lambda)K'_{us}(\lambda)} \\ J_{z}(\lambda) = J'_{us}(\lambda) \left[(e-1)\zeta(\lambda) + 1 \right]^{\frac{1}{n_{i}}} \end{cases}$$
(10)

式中: $J'_{us}(\lambda)$ 、 $D'_{us}(\lambda)$ 、 $K'_{us}(\lambda)$ 和 $\zeta(\lambda)$ 都是关于风电容量占比 λ 的函数。在给定 λ 时,以上参数都可由附录A式(A5)所示的优化问题求解得到。在该优化问题中,优化目标除了各发电设备的统一结构参数,还需增加等效设备的统一结构参数。

为了更直观地展示频率强度指标和风电容量占 比间的关系,图3给出了某电网中频率强度指标随 风电容量占比变化的曲线,图中频率强度指标为标 幺值。



图 3 风电容量占比与频率强度指标间的关系 Fig.3 Relationship between wind power capacity proportion and frequency strength index

由图3可知,随着风电容量占比的增大,相同扰 动下频率跌落深度系数和坡度系数都随之减小,说 明此时系统的频率强度变差。当风电容量占比过大 时,系统在给定扰动下的频率最低点和变化率可能 不满足电网要求,存在频率失稳风险。因此,有必要 进一步研究系统受频率强度指标约束的最大风电容 量占比,即承载能力。

3 考虑频率约束的风电承载能力量化及提 升方法

3.1 考虑频率指标约束的风电承载能力评估

由第2节分析可知,系统风电承载能力的量化需 考虑2种频率强度指标的共同约束。故可建立考虑 频率指标约束的电网风电承载能力评估模型如下:

$$\begin{cases} \max \lambda \\ \text{s.t.} \quad \alpha(\lambda) \ge \alpha_{\min} \\ J_z(\lambda) \ge J_{z_{\min}} \\ 0 < \lambda < 1 \\ \text{附录 A 式 (A5)} \end{cases}$$
(11)

式中: α_{\min} 和 $J_{z_{\min}}$ 为频率强度指标临界值,可以按式 (12)进行计算。

$$\alpha_{\min} = \frac{P_0}{\Delta \omega_{\text{nadir, max}}}, \quad J_{z_{\min}} = \frac{P_0}{\Delta \dot{\omega}_{\max}}$$
(12)

式中: $\Delta \omega_{\text{nadir,max}}$ 和 $\Delta \dot{\omega}_{\text{max}}$ 分别为电网允许的频率最低 点和平均变化率变化的最大幅值。

由2.2节可知,风电容量占比变化会改变系统的 统一结构参数,进而对频率强度指标产生影响。因 此,可考虑采用双层循环优化的方法来求解风电承 载能力。其中,内循环为求解某一占比下系统的频 率强度指标(式(10)),外循环为求解式(11)所示的 风电承载能力。求解流程如附录B图B1所示,具体 详细步骤可描述如下。

步骤1:给定系统风电初始容量占比和统一结构参数初值,求解附录A式(A5)得到系统的统一结构参数。

步骤2:将步骤1中统一结构参数的计算结果代 入式(10)中得到该风电容量占比下的频率强度指标。

步骤3:判断步骤2所得指标是否满足式(11)中的约束条件,若满足则增大风电容量占比值。

步骤4:重复步骤2和步骤3,直至风电容量占比 过大不满足式(11)中的约束条件,此时风电容量占 比即为系统风电承载能力。

在步骤3中,为加快求解速度,可借助序列二次 规划(sequential quadratic programming, SQP)等算 法搜索下一个风电容量占比值^[16]。

需要说明的是,式(11)所示的优化问题中关于 频率强度指标的2个约束条件,在给定系统中进行 承载能力求解时,一般是由其中一个起决定作用的。 下面给出一个示例。在扰动功率不变的情况下,改 变电网对频率特征的要求分析系统风电承载能力变 化情况,如图4所示。可以看出,随着电网对频率最 低点的要求逐渐提高,系统的风电承载能力将从由 频率跌落坡度系数(*J*_z)约束决定过渡到由频率跌落 深度系数(α)约束决定。

3.2 提升风电承载能力的措施讨论

由上文分析可知,系统风电承载能力受限本质 上是系统在扰动下的频率特征不满足要求,即频率 强度指标小于临界值。若想提升系统的风电承载能 力,一方面可提升系统的调频能力,另一方面可放宽 频率约束条件。另外,由于考虑的扰动是由风电机 组造成的,因此还可以通过加快风电有功恢复速率 来减小低电压穿越给系统造成的影响。这几种方法





中,频率约束条件由电网管理者根据电网的规模、设 备承受能力等诸多因素统筹考虑后确定的^[2],而有 功恢复速率的提升要考虑到风电机组机械荷载等约 束^[13-15],这些超出了本文的研究范围。因此,下文将 主要以增强风电的调频能力为例进行分析。

风电机组并网接口的电力电子变流器控制较为 灵活,有大量研究分析得到风电控制中加入虚拟惯 量和快速一次调频控制(附录B图B2给出了一种典 型的实现方式)可以提升系统的调频能力^[17-18]。但 这些文献大多是通过定性分析指出风电调频后承载 能力得到提升或为提升承载能力需要增强风电调频 能力,而缺少量化的结论。针对此问题,本文借助频 率强度指标量化分析了给定风电容量占比下,为满 足频率特征要求,这些风电机组需提供的最小调频 能力。

假设按照电网规划,系统中需要接入的风电容 量占比为λ₀。若接入的风电均不调频,则按上文方 法计算得到的频率强度指标低于临界值。此时,可 给风电机组增加快速一次调频控制(近似于频率的 阻尼)来使指标达到要求(也可采用虚拟惯量等控 制,分析方法类似)。满足要求的最小的一次调频参 数可通过式(13)所示问题进行计算。

$$\begin{cases} \min D_{\text{WTG}} \\ \text{s.t.} \quad \alpha(\lambda_0) \ge \alpha_{\min} \\ J_z(\lambda_0) \ge J_{z_{\min}} \\ \text{附录A式(A5)} \end{cases}$$
(13)

式中:Dwrg为风电机组的快速一次调频参数。

值得注意的是,此时系统的风电容量占比为已 知参数 λ_0 ,需将式(10)中的 λ 替换为 λ_0 ,且附录B式 (B1)所示的风电机组传递函数中 $J_{wrc}=0, D_{wrc}$ 为待 求参数。

4 算例分析

为了验证考虑风电低电压穿越过程中频率强度

指标约束下的风电承载能力量化方法的有效性,本 节将在MATLAB / Simulink 中进行算例分析。

本节在一修改的10机39节点系统(如附录C图 C1所示)中进行仿真验证。该拓扑结构与IEEE 10 机39节点标准系统一致,额定频率为60 Hz。系统初 始的风电容量占比为14%,风电机组为G₅,其余为同 步机组。其中,风电机组配有低电压穿越控制且初 始调频参数为0,负荷为恒功率负荷,系统总容量为 10500 MV·A。风电机组和同步机组的初始容量标 幺值(基准值1000 MV·A)分别为1.5 p.u.和1 p.u., 其出力标幺值分别为0.8 p.u.和0.3 p.u.。同步机组和 风电机组的频率-有功传递函数分别如附录C式 (C1)、附录B式(B1)所示,主要参数如附录C表C1所 示。系统给定的频率最低点与稳态值的偏差和平均 变化率的临界稳定值分别为1 Hz和-1.2 Hz/s^[2,19]。 下文中所有算例的扰动功率均考虑为出力最大的一 台风电机组低电压穿越所带来的有功缺额。

4.1 频率强度指标有效性验证

首先验证本文所提的频率强度指标的有效性和 正确性。考虑如下3种情况:情况1,风电容量占比 为25%;情况2,风电容量占比为30%;情况3,风电 容量占比为45%。

由式(7)可知,频率强度指标取决于系统的统一 结构参数。因此,首先需要计算系统的统一结构参 数,计算结果如附录C表C2所示。各情况下统一结 构近似的系统频率轨迹与对应的共模频率轨迹对比 如附录C图C3所示。以情况2为例,图5给出了设 备的实际轨迹与理论轨迹的对比。由图C3和图5 可知,统一结构下的近似频率轨迹与共模轨迹几乎 重合,且设备的实际轨迹围绕共模轨迹波动,验证了 统一结构参数计算的正确性。



图 5 实际轨迹与统一结构近似共模频率对比

Fig.5 Comparison between actual trajectory and approximate common-mode frequency of unified structure

为了进一步验证频率强度指标的有效性,表1 给出了各情况下的频率强度指标,以及由指标计算 得到的最低点等频率特征与仿真实际值的误差。由 表可知,通过频率强度指标计算得到的频率最低点 与稳态值的偏差 $\Delta\omega'_{n}$ 、频率平均变化率 $\Delta\dot{\omega}$ '与仿真实 际值 $\Delta\omega_{n}$ 、 $\Delta\dot{\omega}$ 之间的相对误差 δ_{1} 和 δ_{2} 很小,验证了指 标的有效性。

表1 频率强度指标及误差分析

Table 1 Frequency intensity index and error analysis

情况	α	$\left \Delta\omega_{n}'\right /Hz$	$\left \Delta\omega_{n}\right /Hz$	$\delta_1 / \ll \delta_0 / \delta_0$	Jz	$\Delta \dot{\omega}' / (\mathrm{Hz} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	$\Delta \dot{\omega} / (\mathrm{Hz} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	$\delta_2 / \ll \delta_0 / \delta_0$
1	62.25	0.77	0.78	1.48	65.41	0.73	0.72	1.63
2	58.10	0.83	0.84	1.48	61.05	0.79	0.77	1.64
3	45.65	1.05	1.07	1.48	47.96	1.00	0.98	1.65

4.2 承载能力量化方法验证

下面验证风电承载能力量化方法的有效性。在 给定的初始场景下(风电容量占比为14%,风电机 组为G₅),由给定的频率最低点与稳态值的偏差和 平均变化率的限值计算得到频率强度指标的临界 值为α_{min}=48 p.u.,*J*_{z_min}=40 p.u.。利用3.1节提出的承 载能力量化评估方法(即式(11)),计算得到理论上 系统中风电承载能力为43.82%。

为验证上述结果的正确性,在仿真中按照该计 算结果将同步机组G₁、G₈和G₁₀替换为风电机组(风 电容量占比为43%),此时系统的频率轨迹如图6所 示。由图可知,在该风电渗透率下,系统频率最低点 与稳态值的偏差几乎贴近1Hz,说明了该风电容量 占比下系统频率最低点刚好处于临界稳定值,此时 系统风电容量占比即为承载能力值。



图6 不同风电容量占比下的频率曲线



若进一步增大风电容量占比到52%和61%,系统频率轨迹如图6所示。当风电容量占比达到52%时,系统满足频率变化率约束但频率最低点与稳态值的偏差大于1Hz,不满足频率最低点约束;当风电容量占比达到61%时,频率变化率和频率最低点都不满足约束条件,这说明了风电承载能力量化方法的有效性。

为进一步说明现有风电承载能力分析中仅考虑 功率阶跃扰动的局限性,下面将按现有文献(例如文 献[6])的方法分析得到的结果与本文所提方法计算 得到的结果进行对比。若采用现有文献中的风电承 载能力分析方法,将最大功率扰动视为风电机组跳 闸或脱网带来的阶跃扰动^[79],则计算得到系统的风 电容量占比为18.11%。在该风电容量占比下进行 仿真,系统的频率响应曲线如图6所示,此时系统频 率最低点和平均变化率均大于临界值,表明系统中 还能够接入更多的风电机组。这意味着采用现有文 献中承载能力评估方法计算会导致结果过于保守, 不利于新能源的进一步接入。

以上算例说明了本文所提的考虑低电压穿越场 景下风电承载能力量化方法的有效性。

4.3 承载能力提升措施有效性验证

最后验证利用风电附加一次调频控制提升风电 承载能力的有效性。当风电不参与调频时,由4.2节 可知风电承载能力为43.82%。若期望提升风电承 载能力到50%,则按3.2节的方法计算得到单位容 量风电的一次调频参数Dwrc至少为1.6 p.u.。

图 7 中红色虚线为风电机组不参与调频,风电容量占比为50%时系统的频率轨迹。可以看出此时频率最低点与稳态值的偏差已经超出了频率稳定的约束。而在相同风电容量占比下,当风电快速一次调频参数达到1.6 p.u.时,系统的频率轨迹如图 7 中蓝色实线所示,恰好满足频率最低点与稳态值的偏差为临界值1 Hz。这意味着在该快速一次调频控制参数下,系统风电承载能力达到 50%,验证了可借助频率强度指标计算风电机组所需提供的调频能力以达到设定的目标风电承载能力的方法的有效性。



图 7 风电调频提升承载能力效果图

Fig.7 Effect diagram of wind power frequency regulation to improve carrying capacity

5 结论

本文研究了考虑风电低电压穿越过程的风电承 载能力量化评估方法,得到主要结论如下。

1)在高风电渗透率系统中,风电具备良好的低 电压穿越能力时,故障后风电低电压穿越相较于脱 网更常见。而该过程中有功扰动并非传统分析中采 用的阶跃形式。为此,提出了考虑低电压穿越场景 下频率稳定约束的风电承载能力量化方法,可准确 评估系统中风电最大容量占比。

2)为提升系统中风电承载能力,提出了可以通 过给风电附加调频控制来定量提升承载能力的 方法。

本文所提方法侧重于理论层面上的研究,在实际工程中的应用将在后续研究中进一步展开。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 徐筱倩,黄林彬,汪震,等. 双馈风电机组虚拟惯量控制对电力系统机电振荡的影响分析[J]. 电力系统自动化,2019,43 (12):11-17.

XU Xiaoqian, HUANG Linbin, WANG Zhen, et al. Analysis on impact of virtual inertia control of DFIG-based wind turbine on electromechanical oscillation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12):11-17.

- [2] 王宝财,孙华东,李文锋,等.考虑动态频率约束的电力系统最 小惯量评估[J].中国电机工程学报,2022,42(1):114-127.
 WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(1): 114-127.
- [3]高晖胜,辛焕海,黄林彬,等.新能源电力系统的共模频率分析 及其特征量化[J].中国电机工程学报,2021,41(3):890-900.
 GAO Huisheng, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Characteristic analysis and quantification of common mode frequency in power systems with high penetration of renewable resources
 [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(3):890-900.
- [4] GAO Huisheng, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Commonmode frequency in converter-integrated power systems: definition, analysis, and quantitative evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6):4846-4860.
- [5] 刘洋,邵广惠,张弘鹏,等.新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术,2020,44(2):683-689.
 LIU Yang, SHAO Guanghui, ZHANG Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid[J].
 Power System Technology,2020,44(2):683-689.
- [6]赵珊珊,周勤勇,赵强,等. 计及频率约束的风电最大接入比例 研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(增刊1):24-31.
 ZHAO Shanshan,ZHOU Qinyong,ZHAO Qiang, et al. Research on maximum penetration level of wind generation considering frequency constraint[J]. Proceedings of the CSEE,2018, 38(Supplement 1):24-31.
- [7]李元臣,文云峰,叶希,等.基于多新息辨识的电力系统节点惯量估计方法[J].电力自动化设备,2022,42(8):89-95.
 LI Yuanchen, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Estimation method of power system nodal inertia based on multi-innovation identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42 (8):89-95.
- [8]郭小龙,毕天妹,刘方蕾,等.风、光高渗透率电网中考虑频率 稳定的可再生能源承载力研究[J].可再生能源,2020,38(1): 84-90.

GUO Xiaolong, BI Tianshu, LIU Fanglei, et al. Estimating maximum penetration level of renewable energy based on frequency stability constrains in networks with high penetration wind and photovoltaic energy[J]. Renewable Energy Resources, 2020,38(1):84-90.

- [9] 贺海磊,张彦涛,孙骁强,等.考虑频率安全约束的西北电网新 能源开发及直流外送规模评估方法[J].中国电机工程学报, 2021,41(14):4753-4762.
 HE Hailei, ZHANG Yantao, SUN Xiaoqiang, et al. Evaluation method of renewable energy development scale and DC transmission scale of China northwest power grid by considering frequency security constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(14):4753-4762.
- [10] 张琳,仇卫东.大规模风电脱网事故的几点思考[J]. 电力建设,2012,33(3):11-14.
 ZHANG Lin,QIU Weidong. Consideration of large-scale wind

farm disconnection from grid[J]. Electric Power Construction, 2012.33(3):11-14.

- [11] 柴海棣,赵晓艳,魏超,等.风电汇集系统连锁脱网事故影响因素分析[J].中国电力,2015,48(9):134-139.
 CHAI Haidi, ZHAO Xiaoyan, WEI Chao, et al. Cause study on cascading trip-off accident in wind farm cluster[J]. Electric Power,2015,48(9):134-139.
- [12] 向昌明,范立新,蒋一泉,等.风电场内风电机组连锁脱网机理 与低电压穿越能力研究[J].电力自动化设备,2013,33(12): 91-97.

XIANG Changming, FAN Lixin, JIANG Yiquan, et al. Analysis of cascading trip-off mechanism and low voltage ride through capability of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12):91-97.

- [13] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.风电场接入 电力系统技术规定 第1部分:陆上风电:GB/T 19963.1— 2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [14] KARBOUJ H, RATHER Z H. Impact of voltage dip induced delayed active power recovery on wind integrated power systems[J]. Control Engineering Practice, 2017, 61:124-133.
- [15] HAZEM K, HUSSAIN R. A novel wind farm control strategy to mitigate voltage dip induced frequency excursion[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2):637-645.
- [16] 黄大明,蒋顺梅,杨春兰. 基于最小特性值的破碎机机构参数 Matlab优化设计[J]. 机械设计与制造,2012(1):4-6.
 HUANG Daming, JIANG Shunmei, YANG Chunlan. Optimal design for mechanism parameters of crusher based on minimum eigenvalue by Matlab[J]. Machinery Design & Manufacture,2012(1):4-6.
- [17] 刘中建,周明,李昭辉,等. 高比例新能源电力系统的惯量控制

技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(12): 1-11,53.

LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 1-11, 53.

- [18] 高晖胜,訾鹏,黄林彬,等. 能量约束下电力电子并网装备的最优频率控制[J]. 电力系统自动化,2020,44(17):9-18.
 GAO Huisheng, ZI Peng, HUANG Linbin, et al. Optimal frequency control of grid-connected power electronic devices with energy constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(17):9-18.
- [19] 雷傲宇,周剑,梅勇,等."3·3"中国台湾电网大停电事故分析及启示[J].南方电网技术,2022,16(9):1-9.
 LEI Aoyu,ZHOU Jian,MEI Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Taiwan power grid on March 3,2022[J]. Southern Power System Technology,2022,16(9):1-9.

作者简介:



吴 琛(1974—),女,教授级高级工程 师,硕士,主要研究方向为电力系统及其自 动化(E-mail:elfwu@21cn.com);

花赟玥(1998—),女,硕士研究生,主 要研究方向为新能源并网稳定性分析与控 制(E-mail:22010069@zju.edu.cn);

高晖胜(1995—),男,博士研究生,通信 作者,主要研究方向为电力系统频率稳定分 析与控制(E-mail:gaohuisheng@zju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Quantification method of wind power bearing capacity considering frequency stability constraint in low voltage ride-through scenario

WU Chen¹, HUA Yunyue², CHEN Kexin², HUANG Wei³, XIE Yigong³, GAO Huisheng²

Power Grid Planning and Construction Research Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650033, China;
 College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Electric Power Dispatching and Control Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunning 650011, China)

Abstract: The active power of wind turbines with good low voltage ride-through capability can be gradually recovered after fault, and the active power disturbance brought by this process to the system is not a step form. If the step disturbance is still considered when evaluating the wind power carrying capacity of system, the evaluation results will be more conservative. In order to solve this problem, the system frequency intensity indexes are proposed to quantify the key frequency characteristics of system, such as frequency nadir and the average variation rate of frequency during low voltage ride-through process. Then, the relationship between the index and the proportion of wind power in the system is analyzed. Combined with the indexes and the constraints of frequency characteristics such as frequency nadir and so on depending on grid, the bi-level optimization model is established to quantitatively evaluate the wind power carrying capacity of system in the low voltage ride-through scenario, which can realize the accurate evaluation of wind power carrying capacity, the minimum frequency regulation capability that wind turbines need to be provided can be quantitatively analyzed by means of frequency intensity index when the wind power carrying capacity analyzed by means of frequency intensity index when the wind power carrying capacity and improvement measures is verified by simulation.

Key words: wind power; low voltage ride-through; active power recovery; non-step disturbance; frequency intensity index; bearing capacity

附录 A

多机系统中共模频率可以反映系统整体的频率变化趋势,其轨迹与单机系统类似,如图 A1 中实线 所示。文献[A1-A3]等大量研究表明,系统的频率轨迹一般符合图中实线的变化规律。该轨迹的变化规律 为在扰动后一段时间内近似于阻尼正弦曲线,如图 A1 中虚线所示,扰动后一段时间内跌落至频率最低 点,然后逐渐恢复。在关心的时间段内,阻尼正弦曲线与共模频率误差较小,可以分析最低点等频率特 征。



图 A1 系统频率轨迹及其近似

Fig.A1 System frequency trajectory and its approximation

具体地,上图阻尼正弦曲线可表示为:

$$\Delta \omega(t) = -A e^{\sigma t} \sin(\omega_{\rm d} t) \tag{A1}$$

式中: $A \ \sigma \ \omega_{d}$ 为曲线参数。

对式(A1)进行拉氏变换可以得到:

$$\Delta\omega(s) = -\frac{A\omega_{\rm d}}{s^2 - 2\sigma s + \sigma^2 + \omega_{\rm d}^2} \tag{A2}$$

考虑单机系统中发生大小为 Pao 的功率阶跃扰动,此时根据式(2)知系统的频率响应可表示为:

$$\Delta\omega(s) = -\frac{1}{G(s)} \frac{P_{d0}}{s} \tag{A3}$$

式中: G(s)为系统中发电设备的频率-有功传递函数。

对比式(A2)和式(A3)可知,可采用式(A4)所示的(即文中式(4))所示的统一结构模型来近似获得发电设备的功率响应,使式(A2)和式(A3)的在关心的时间段内频率响应相同。

$$G_{u,i}(s) = J_{u,i}s + D_{u,i} + \frac{1}{K_{u,i}s}$$
(A4)

式中: *J*_{u,i}、*D*_{u,i}和 1/*K*_{u,i}为统一结构参数,分别称为有效惯量、有效阻尼系数和有效动态调差系数。 求解各发电设备统一结构模型参数实际上可以看成参数优化问题,可表示为:

$$\begin{array}{l} \min_{J_{u,i},D_{u,i},\frac{1}{K_{u,i}}} & \int_{t_0}^{t_i} (\Delta P_i(t) - \Delta P'_i(t)) dt \\ \text{s.t.} & \Delta P_i(s) = G_i(s) \Delta \omega(s) \\ & \Delta P'_i(s) = G_{u,i}(s) \Delta \omega(s) \end{array} \tag{A5}$$

式中: $\Delta P_i(t)$ 和 $\Delta P_i'(t)$ 分别为第 *i* 个发电设备的实际功率响应和统一结构近似的功率响应; t_0 和 t_f 分别为关 心时间段的初时刻和终时刻, t_0 一般取扰动开始时刻, t_f 一般取 1.5 倍频率最低点时间; $J_{u,i}$ 、 $D_{u,i}$ 和 1/ $K_{u,i}$ 为待优化参数。但求解该优化问题时,需要将共模频率 $\Delta \omega(s)$ 作为输入来计算得到 $\Delta P_i(t)$ 和 $\Delta P_i'(t)$ 。当共模 频率阶数很高时,会导致计算量很大。为此,可以用统一结构模型近似的共模频率 $\Delta \omega_u(s)$ 代替 $\Delta \omega(s)$ 以简 化计算量,此时优化问题可以采用最小二乘法进行迭代求解。具体迭代过程如下:

- 1)估计系统中所有发电设备的统一结构参数初值;
- 2)将统一结构参数代入式(5)即可得到近似的共模频率 $\Delta o_{\mu}(s)$;
- 3)基于Δω_u(s)求解式(A5)所示的优化问题,并更新各设备的统一结构参数;
- 4)循环迭代步骤2)和步骤3)直至参数收敛。



图 B1 风电承载能力量化评估流程图





图 B2 综合虚拟惯量控制框图 Fig.B2 Control block diagram of integrated virtual inertia control

风电机组变流器为文献[A4]中的模型,其控制环节如图 B2 所示,频率-有功传递函数可表示为:

$$G_{\rm WTG}(s) = \frac{(sK_{\rm P}\omega_0 + K_{\rm I}\omega_0)(J_{\rm WTG}s + D_{\rm WTG})}{T_{\rm f,PLL}s^3 + s^2 + sK_{\rm P}\omega_0 + K_{\rm I}\omega_0} \frac{1}{T_{\rm f,P}s + 1} \frac{K_{\rm P_PC}s + K_{\rm I_PC}}{(K_{\rm P_PC} + 1)s + K_{\rm I_PC}}$$
(B1)

式中: *J*_{WTG} 和 *D*_{WTG} 分别为虚拟惯量和阻尼系数; *T*_{f_PLL} 为滤波器的时间常数; *T*_{f_P} 为低通滤波器的时间 常数; *K*_P 和 *K*_I 分别是锁相环的 PI 调节器的比例和积分参数; *K*_{P_PC} 和 *K*_{LPC} 分别是有功外环的 PI 调节器 的比例和积分参数。 附录 C



图 C1 10 机 39 节点系统

Fig.C1 10-generator 39-bus system

算例系统中的同步机为汽轮机组,同步机的频率-有功传递函数可表示为:

$$G_{\rm SG}(s) = J_{\rm SG}s + D_{\rm SG} + G_{\rm T}(s) \tag{C1}$$

式中: J_{SG} 和 D_{SG} 分别为同步机的惯量和阻尼系数; $G_{T}(s)$ 为汽轮机调速系统的传递函数(输入为频率 $\Delta \omega$,输出为机械功率 ΔP_{M}),其模型如图 C2 所示。



图 C2 汽轮机调速器模型

Fig.C2 Model of turbine-governor

各发电设备的主要参数如表 C1 所示。

表 C1 发电设备的主要参数

Table C1 Main parameters of generation units

机组	惯量(虚拟惯量)/p.u.	一次调频参数/p.u.	比例积分参数/p.u.	时间常数/s
SG	$J_{ m SG}=8$	D _{SG} =0	K=20 $K_{1}=0.5$ $K_{1}=0.22$ $K_{3}=0.22$ $K_{5}=0.3$ $K_{7}=0.26$	$T_{1}=0.2$ $T_{2}=0$ $T_{3}=0.1$ $T_{4}=0.2$ $T_{5}=6$ $T_{6}=6$ $T_{7}=0.4$
WTG	J _{WTG} =0	$D_{ m WTG}=0$	K _{P_PC} =0.5 K _{I_PC} =10	$T_{\rm f_PLL} = 0.01$ $T_{\rm f_P} = 0.05$



表 C2 设备统一结构参数 Table C2 Unified structure parameters

图 C3 各算例共模频率和统一结构近似共模频率对比

25%

共模频率 统一结构 30%

45%

Fig.C3 Comparison of common-mode frequency and approximate common-mode frequency of unified structure

参考文献:

- [A1] 张剑云,李明节.新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3498-3507.
 ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507.
- [A2] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major distribunces[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(4): 1637-1642.
- [A3] 刘柳,李卫东,唱友义,等. 大功率缺失下频率最低点估计的低阶仿真模型[J]. 电力系统自动化,2019,43(17):78-83. LIU Liu, LI Weidong, CHANG Youyi, et al. Low-order simulation model for frequency nadir estimation with high power deficit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 78-83.