

提高STATCOM / BESS风电系统频率与电压支撑的智能联调优化控制方法

刘青, 徐宏璐

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:针对风电并网系统运行中负荷突变引起的频率波动和并网点电压的骤升/骤降问题,提出一种基于储能型静止同步补偿器(STATCOM / BESS)的频率与电压智能联调优化控制方法,该方法在具体实施过程中分为实时监测层、动态决策层和执行控制层3层,各层之间紧密联系,形成可靠闭环。首先,在实时监测层,基于风速分区与模糊控制判断风机的调频能力、系统有功需求及无功需求;其次,在动态决策层,综合考虑惯性常数和并网点电压,结合风机无功可调范围,动态优化有功、无功分配策略;最后,在执行控制层,风电机组与STATCOM / BESS对功率指令进行控制执行,STATCOM / BESS强化虚拟惯性时,考虑蓄电池(BESS)荷电状态,基于反馈动态调整其工作模式,控制结束后将相关参数及时反馈。仿真结果表明,基于STATCOM / BESS的风电系统智能联调优化控制可有效改善频率与电压的动态响应,提高频率与电压支撑能力。

关键词:风电; STATCOM / BESS; 智能联调控制; 调频能力; 模糊逻辑; 频率支撑; 电压支撑

中图分类号: TM 761; TM 614

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202007002

0 引言

近年来,风电机组大规模并网,其随机性与波动性给系统调频与调压控制带来很大挑战。相比于传统电力系统,风电并网系统中风电与常规能源协同运行,且随着风电渗透率逐渐增加,包括频率稳定性、电压稳定性在内的电力系统稳定性问题向风电并网系统提出了更高的要求。风电并网系统中通常采用的下垂控制是有差调节,负荷波动等原因会导致系统频率及并网点电压均与额定值存在偏差,若通过改变下垂系数来减小频率与并网点电压偏差,则会引起系统稳态及动态性能变差^[1-3]。因此,研究更为行之有效的综合考虑频率与电压的控制方法,可有效提高风电并网系统的安全稳定运行。

目前,国内外关于提高频率支撑的研究主要集中在虚拟同步发电机(VSG)和储能技术。VSG通过增加下垂控制、虚拟转动惯性和阻尼环节,模拟同步发电机的一次调频作用^[4]。文献[5]基于运行状态评估使得风机自适应VSG控制在不同出力水平下均可有效支撑系统频率。储能技术广泛应用于平抑风电与光伏有功出力波动^[6-7]、增强新能源系统的虚拟惯性^[8]等。关于电压支撑问题亦有诸多学者展开了深入广泛的研究。文献[9]提出了基于模型预测控制(MPC)的多时间尺度电网无功电压优化控制方法。文献[10]提出了受端系统电压支撑强度因子,并得到了换流母线静态电压稳定判别的方法。

储能型静止同步补偿器(STATCOM / BESS)具有有功和无功2个自由度^[11],可平滑快速地与系统交换有功与无功。文献[12]利用STATCOM / BESS克服负荷突变带来的不利影响,使得风电场成功“穿越”故障。文献[13]利用STATCOM / BESS强化风机VSG的虚拟惯性并为风机并网点电压提供可靠的无功补偿。文献[14]利用STATCOM / BESS提供无功功率支撑并网点电压,同时吸收多余的有功功率以避免对光伏发电系统造成危害。文献[15]研究了STATCOM / BESS对风电场功率平抑和无功补偿的协调控制策略,保证了系统中功率的平衡稳定。目前,鲜有文献将频率与电压综合考虑进行协调控制,且相关研究缺乏风电机组与STATCOM / BESS的有效配合。

本文针对上述问题,基于STATCOM / BESS提出一种频率与电压智能联调优化控制方法,该方法由上至下分为实时监测层、动态决策层和执行控制层3层,各层之间紧密联系,形成可靠闭环。上层为下层提供数据基础,下层向上层提供及时反馈,利用风电机组与STATCOM / BESS的智能联调,实现系统的一次调频与电压支撑。在实时监测层,基于风速分区^[16]与模糊控制判断风电机组调频能力、系统有功需求及无功需求;在动态决策层,综合考虑惯性常数和并网点电压,结合风电机组无功可调范围,动态优化有功、无功分配策略;在执行控制层,风电机组与STATCOM / BESS对功率指令进行控制执行,且STATCOM / BESS基于BESS荷电状态反馈动态调整其工作模式,控制结束后将相关参数及时反馈。仿真结果表明,所提联调控制可有效改善频率与电

收稿日期: 2019-11-13; 修回日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507065)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507065)

压的动态响应,提高频率与电压支撑能力。

1 频率与电压智能联调控制架构

为充分利用风电机组与 STATCOM / BESS 的调频和调压能力,将整个智能联调控制由上至下分为实时监测层、动态决策层和执行控制层3层,如附录A中图A1所示。

实时监测层负责采集系统频率、并网点电压、实时风速、STATCOM / BESS 有功与无功备用容量等状态信息,判断当前风速所在分区是否具有调频能力;根据频率变化特性(频率偏差、频率变化率)得到系统频率响应有功需求,以并网点电压作为参考点,通过电压控制模式得到系统电压调节无功需求,从而为动态决策层的有功、无功优化分配提供数据支持。

动态决策层以系统惯性常数最大化、电压偏差最小化为目标,对频率、电压进行智能联调优化控制,根据电压灵敏度得到电压偏差,由于风电机组无功出力调节范围受其有功出力影响,在利用优化算法求解过程中,每次迭代时根据风电机组有功出力对其无功调节范围进行更新,最终得到风电机组与 STATCOM / BESS 的动态有功、无功补偿量。

执行控制层根据动态决策层得到的有功、无功最优分配对风电机组和 STATCOM / BESS 的有功、无功参考值进行修正,灵活迅速地响应频率及电压变化。为防止风电机组转速恢复期间可能导致系统功率失衡更加严重,引入转速恢复模块帮助转子以更快的速度恢复至最佳运行状态。待频率与电压恢复稳定后,执行控制层利用积分计算方法并计及充放电效率估算 BESS 的剩余存储电量,将 STATCOM / BESS 的有功、无功储备反馈给实时监测层,实时监测层对监测数据进行更新校正,为下一次联调控制做充分准备。

综上,本文所提频率与电压智能联调优化控制方法层层相联,且形成可靠闭环,上层为下层提供数据基础,下层向上层提供及时反馈,实现风电机组与 STATCOM / BESS 对系统的一次调频与并网点电压支撑。下面对各层具体设计进行详细介绍。

2 状态信息的实时监测与评估

2.1 风电机组调频能力

在转速 ω_w 下,忽略阻尼作用,风机转子部分所具有的旋转动能 E_{kw} 为:

$$E_{kw} = \frac{1}{2} J_w \omega_w^2 \quad (1)$$

其中, J_w 为风电机组转动惯量。

通常,惯性常数 H 定义为在转速 ω_w 下的旋转动能与额定容量 S_N 之比,即:

$$H = \frac{J_w \omega_w^2}{2S_N} \quad (2)$$

转子动能控制将储存在风电机组转子上的旋转动能转化为电磁功率,改变风电机组有功输出为系统频率提供一定有功支撑。转子动能控制的响应能力与转子转速密切相关,可表示为:

$$\Delta E_{kw} = H(\omega_w^2 - \omega_{w,\min}^2) \quad (3)$$

其中, ΔE_{kw} 为风机转子响应过程中可提供的动能; $\omega_{w,\min}$ 为风电机组最低转速。

当系统频率波动时,风电机组可用于提高系统频率响应能力的有功功率变化量 ΔP_w 为:

$$\Delta P_w = J_w \omega_w \frac{d\omega_w}{dt} \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)得:

$$\Delta P_w = \frac{2HS}{\omega_w} \frac{d\omega_w}{dt} \quad (5)$$

风电机组的转子转速存在极值约束,即 $\omega_{w,\min} \leq \omega_w \leq \omega_{w,\max}$,其中 $\omega_{w,\max}$ 为风电机组最高转速。不同风速下机组对应的出力即调频能力不同,将风电机组风速分为最低风速恒定区、最大功率点跟踪(MPPT)区、最高风速恒定区和桨距角控制区4个区间,如附录A中图A2所示。

风速位于最低风速恒定区时风电机组转子动能不足,在桨距角控制区时输出功率达到最大,无法增发功率,故风速位于这2个区间时,风电机组无法参与调频。风速位于MPPT区时,风电机组可捕获当前风速下的最大输出功率;风速位于最高风速恒定区时,输出功率随风速增大而增大,最终达到额定值。因此,风速位于这2个区间时,可利用转子动能控制参与调频。

2.2 频率响应功率需求

当系统发生频率波动时,基于模糊逻辑控制算法,根据当前频率特性,决定系统调频响应的功率需求 ΔP_{ref} 。本文将频率偏差 Δf ($-1 \sim 0.6$ Hz) 和频率变化率 df/dt ($-0.6 \sim 0.6$ Hz/s) 作为模糊逻辑控制器的输入,输出为满足频率支撑所提供的有功功率($0 \sim 0.5$ p.u.)。该控制器根据频率偏差与频率变化率情况实时获得频率响应功率需求。经动态决策层的有功分配优化,STATCOM / BESS 与风电机组共同承担调频响应的功率需求,提高系统频率响应能力,达到充分利用转子动能与 BESS 联调控制的目的。

2.3 电压调节无功需求

在并网点电压出现骤升/骤降甚至超过系统要求上/下限时,通过向电网注入一定的容性/感性无功以改变并网点与电网间的等效阻抗压降,将并网点电压稳定在规定的范围之内,达到无功支撑的目的。以并网点电压为参考点,通过电压联调

控制对电压调节无功需求进行估算。在电压联调控制下,并网点电压水平得到可靠校正控制,并最终给定系统电压调节所需补偿的无功功率 ΔQ_{ref} 。

3 功率动态决策优化模型的建立与求解

3.1 风电机组无功调节范围

风电机组输出的总有功/无功功率均由定子侧和网侧换流器输出有功/无功2个部分组成,综合考虑转子侧、定子侧最大电流约束,可得定子侧无功调节范围,而网侧换流器无功调节极限主要受限于换流器容量,将两者结合可得风电机组的无功调控极限,推导过程详见文献[17],本文不再赘述。

3.2 有功、无功优化分配模型

频率与电压智能联调优化控制旨在最大化系统惯性常数、最小化并网点电压偏差,以此为目标建立综合考虑系统惯性常数和并网点电压的目标函数如下:

$$\min f(x) = \min \left(k_1 \frac{1}{H} + k_2 \Delta U_{\text{PCC}} \right) \quad (6)$$

其中, ΔU_{PCC} 为并网点电压偏差; k_1 、 k_2 为各优化变量对应的权重系数,根据系统调节需要进行设置,即重要程度越高则权重系数越大,且满足 $k_1 + k_2 = 1$ 。

引入STATCOM/BESS与风电机组共同承担调频任务后, $\Delta P_{\text{ref}} = \Delta P_w + \Delta P_s$,其中 ΔP_s 为STATCOM/BESS用于提高系统频率响应能力的有功功率变化量。则由式(5)可得惯性常数 H 为:

$$H = \frac{(\Delta P_w + \Delta P_s) \omega_w}{2 S_N d\omega_w / dt} \quad (7)$$

电压灵敏度因子反映了节点注入功率变化对节点电压的影响程度^[18],因此注入功率变化所引起的风机并网点电压偏差 ΔU_{PCC} 可表示为:

$$\Delta U_{\text{PCC}} = \frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial U_{\text{PCC}}}{\partial Q} \Delta Q \quad (8)$$

其中, ΔP 、 ΔQ 分别为节点注入有功、无功功率变化量; $\partial U_{\text{PCC}} / \partial P$ 、 $\partial U_{\text{PCC}} / \partial Q$ 分别为并网点有功、无功电压灵敏度系数,取决于系统结构和运行状态,通常不会随系统运行状态变化而发生较大变化。该优化模型的约束条件详见附录B。

本文频率与电压智能联调控制问题表现为非线性、多约束、设备类型多且特征差异明显。纵横交叉算法可有效应对模型非线性的影响,避免陷入局部最优^[19]。该算法的核心在于其具有纵向、横向交叉算子,纵向交叉算子在个体变量间随机配对,保证种群能够有效避免局部最优;横向交叉算子将种群中所有个体两两随机配对,两个体中所有相同维的进行算术交叉。通过纵向、横向交叉算子的持续作用,当种群中某个体变量产生有利于搜索全局最优解的

变化时,变化信息通过算子迅速传递给种群中的各个变量,实现对全局最优解的快速逼近。

利用该优化算法对本文智能联调控制进行优化时,求解过程中每次迭代均要考虑风电机组不同有功输出导致的无功输出极限不同,最终得到风电机组与STATCOM/BESS应提供的有功与无功功率参考值。

4 风电机组与STATCOM/BESS的智能联调控制方法

4.1 风电机组控制策略

频率方面,在系统频率跌落时,风电机组通过降低自身转子转速,释放部分转子动能以提供频率支撑,灵活迅速响应系统的频率变化;电压方面,风电机组正常情况下运行在功率因数模式,当发生电压跌落时切换为无功控制模式。网侧换流器可通过控制无功电流分量来控制无功功率的输出,在电压跌落时为系统提供一定的无功支撑能力。

在风电机组释放转子动能后,转速恢复阶段会向电网吸收能量,若在频率尚未恢复稳定时转速便开始恢复,可能导致系统功率失衡现象更加严重,使系统频率偏差增大,频率响应特性变差,严重情况甚至可能导致系统频率出现二次跌落。为解决转速恢复可能导致的频率二次跌落问题,本文在风电机组有功控制环节中添加转速恢复模块^[20],帮助发电机转子以更快的速度恢复到最佳运行状态。为避免转速恢复功能对于有功支撑的削弱,当风电机组输出功率恢复到初始值且持续时间超过1s时,再投入转速恢复模块,防止暂态过程的二次扰动影响频率稳定。

4.2 BESS控制模式

STATCOM/BESS之所以能够参与电网一次调频,一方面是因为风电机组转子动能的惯性调节能力可能被“埋没”,在系统频率发生波动时,风电系统无法提供足够的惯量支持,而STATCOM/BESS具备快速、精准的功率响应能力,可以提高风电机组的频率支撑能力;另一方面是因为STATCOM/BESS能够将大量风电机组容量从繁重的调频功能中解放出来,提升机组的运行经济性和使用寿命,减少一次调频备用容量。

在调频过程中BESS装置起到关键作用,因此BESS的运行条件值得重点研究。BESS过充或过放会导致电池过热损坏或加速老化。为防止BESS过度充放电,需考虑BESS的荷电状态 λ_{soc} ,根据不同的荷电状态,STATCOM/BESS表现为不同的工作模式。

BESS荷电状态指装置剩余存储电量与额定容量的比值,可利用积分计算方法并计及充放电效率估计BESS中的剩余存储电量^[21]。

$$\lambda_{\text{soc}}(t) = \begin{cases} \lambda_{\text{soc}}(t-T) - \eta_c \frac{P(t)T}{3600C} & P(t) < 0 \\ \lambda_{\text{soc}}(t-T) - \frac{1}{\eta_f} \frac{P(t)T}{3600C} & P(t) > 0 \\ \lambda_{\text{soc}}(t-T) & P(t) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\lambda_{\text{soc}}(t)$ 、 $\lambda_{\text{soc}}(t-T)$ 分别为 t 时刻和 $t-T$ 时刻 BESS 的荷电状态值, T 为控制周期; η_c 、 η_f 分别为充电、放电效率; $P(t)$ 为 t 时刻 BESS 的放电功率(充电时 $P(t)$ 为负); C 为 BESS 的额定容量。

由式(9)可对荷电状态进行实时反馈, 相关研究表明 BESS 使用寿命与其最大充放电深度的关系最为密切。为尽可能延长 BESS 的使用寿命, 设置 λ_{soc} 上、下限值分别为 80%、20%^[22], 将所得反馈值与上、下限值进行比较, 从而决定 STATCOM/BESS 的工作模式。

(1) 当 $|\Delta f| \leq \alpha$ 或 $\lambda_{\text{soc}} < 20\%$ 时(α 为阈值, 为减小功率微小波动或仪器误差造成的转动惯量误变动), 装置只与系统进行无功交换, 有:

$$P(t) = 0 \quad (10)$$

(2) 当 $|\Delta f| > \alpha$ 且 $\lambda_{\text{soc}} > 20\%$ 时, BESS 进行放电($\lambda_{\text{soc}} = 20\%$ 时停止放电), 有:

$$P(t) = \Delta P_s \quad (11)$$

满足以上原则, 则可防止 BESS 过度充放电, 有效延长了 BESS 的使用寿命。

足够的 λ_{soc} 可确保 BESS 能够提供足够的补偿, 但若 λ_{soc} 不足, 当检测到下一个控制周期 λ_{soc} 将低于 20% 时, BESS 会降低其有效输出并快速进入停止放电状态, 这将对系统频率稳定性造成二次伤害。为防止系统频率发生二次跌落, BESS 应具备合理的容量配置, 相应配置原则可参见文献[13]。综上, 频率与电压联调控制原理如附录 C 中图 C1 所示。

5 仿真分析

为验证本文方法的有效性, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建了 STATCOM/BESS 风电系统仿真模型, 如附录 C 中图 C2 所示。采用容量加权单机等值法, 使用 1 台等值风电机组进行等值, 其额定功率为 200 MW, 机端电压为 690 V, 经 0.69 kV/10.5 kV 升压变压器后, 接入 10.5 kV 母线, 通过 2 台额定容量为 31.5 MV·A 的 10.5 kV/66 kV 升压变压器接入 66 kV 母线的外送输电线路。在 10.5 kV 母线上安装 1 台 STATCOM/BESS, 最大能够提供 30 Mvar 的无功功率和 70 MW 的有功功率, 可控恒功率负载 $P_L = 150$ MW。

电网频率升高时, 风电机组可通过增加桨距角降低其输出功率, 实现方法较为简单, 因此本文只分析频率与电压跌落时智能联调控制方法的有效性。在 20 s 时将 P_L 增加 50 MW, 选取风速为 10 m/s (MPPT 区) 和 13 m/s (桨距角控制区) 的仿真结果对

方法进行验证。

5.1 功率动态优化决策结果

动态决策层以最大化惯性常数和最小化电压偏差为目标函数, 优化风电机组和 STATCOM/BESS 的有功和无功功率分配, 智能调节频率和电压。表 1 给出了在风速分别处于 MPPT 区和桨距角控制区时, 有、无优化情况下的功率分配情况。表中, ΔQ_w 、 ΔQ_s 分别为风电机组、STATCOM/BESS 用于系统电压调节的无功功率变化量。

表 1 功率分配对比

参数	风速 / (m·s ⁻¹)	数值	
		无优化	有优化
ΔP_{ref}	10	76 MW	76 MW
	13	68 MW	68 MW
ΔQ_{ref}	10	32 Mvar	32 Mvar
	13	29 Mvar	29 Mvar
ΔP_w	10	29 MW	24 MW
	13	0	0
ΔQ_w	10	5 Mvar	8 Mvar
	13	8 Mvar	13 Mvar
ΔP_s	10	47 MW	52 MW
	13	68 MW	68 MW
ΔQ_s	10	27 Mvar	24 Mvar
	13	21 Mvar	16 Mvar

由表 1 可知, 当风速相同时, 无论是否存在动态优化决策, 频率调节所需的功率(ΔP_{ref})和电压调节所需的功率(ΔQ_{ref})要求都是相同的。在这种情况下, 动态决策层对风电机组和 STATCOM/BESS 提供的功率输出进行了优化分配。

5.2 风速位于 MPPT 区时的仿真结果

下面分别给出负载增加情况下, 风速为 10 m/s 时的系统频率响应、风电机组有功与无功输出、STATCOM/BESS 有功与无功输出及风电机组并网点电压的变化情况。

图 1 为系统频率响应。由图 1 可见, 负载 P_L 在 20 s 时增加 50 MW, 导致有功输出在负载增加瞬间小于有功需求, 引起系统频率下降。相比于无 STATCOM/BESS 补偿虚拟惯性的情况, 引入联调控制后, 系统频率响应得到明显的改善, 频率最低值由 49.73 Hz 上升至 49.86 Hz, 提升了 0.13 Hz, 且频率恢复至稳定状态的时间由 15 s 缩短至 5 s 左右。可见所提联调控制方法极大改善了系统频率恢复稳定

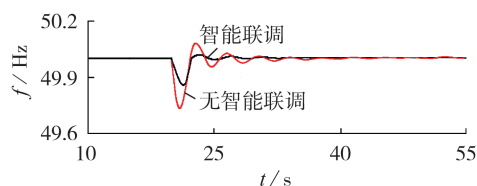


图 1 系统频率响应(MPPT 区)

Fig.1 Response of system frequency(MPPT zone)

的能力,提高了风电系统的安全水平和稳定裕度。

图2(a)、(b)分别为频率支撑过程中风电机组和STATCOM/BESS的有功输出,系统频率响应总功率需求经模糊逻辑控制器得出,经动态决策层优化后分配给风电机组与STATCOM/BESS共同承担。在调频初期,风电机组降低转速释放有功,但随着转速下降,风电机组逐渐降低出力,此时主要频率支撑由STATCOM/BESS提供,辅助风电机组实现频率恢复。

STATCOM/BESS实时动态地与系统双向交换无功功率,优化风电系统的无功潮流,维持风机并网点电压稳定,频率支撑期间经电压协调控制,风电机组和STATCOM/BESS的无功输出分别如图2(c)、(d)所示,风机并网点电压(标幺值)如图3所示。

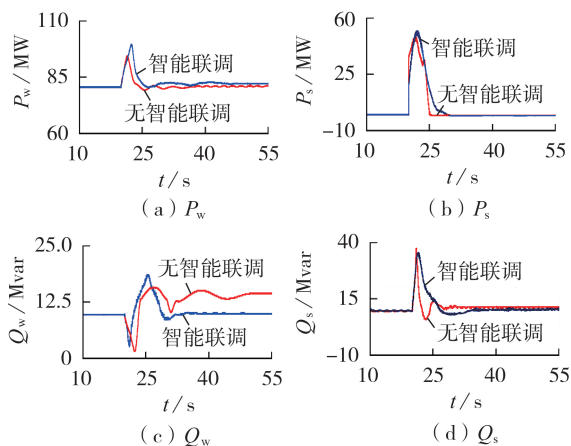


图2 风电机组与STATCOM/BESS功率输出(MPPT区)

Fig.2 Power output of wind turbine and STATCOM/BESS(MPPT zone)

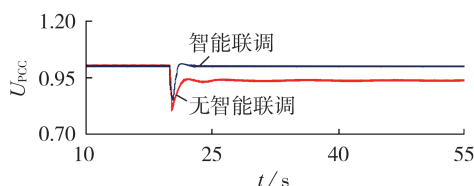


图3 风机并网点电压(MPPT区)

Fig.3 PCC voltage of wind turbine(MPPT zone)

由图2、3可见,20 s时负载突然增加,风机并网点电压下降,STATCOM/BESS立即提高无功输出,使得电压小幅波动后短时内稳定在额定值附近,对比可知引入智能联调后的功率输出更加稳定。无智能联调控制时,电压跌落最低点为0.8 p.u.,且由于是有差调节最终无法恢复至额定值。引入智能联调控制后电压跌落最低点为0.85 p.u.,并在短暂跌落恢复至额定值,增强了系统应对新能源电力和负荷波动的能力,保证新能源充分消纳、频率与电压有效支撑的可靠实现。

5.3 风速位于桨距角控制区时的仿真结果

由于风速变化主要影响风电机组有功输出,相

应的无功输出以及并网点电压调节情况与风速位于MPPT区时的仿真结果类似,因此接下来只给出负载增加情况下,风速为13 m/s时的频率响应及STATCOM/BESS有功输出的仿真结果,如图4所示。当风速位于桨距角控制区时,风电机组无法参与系统调频,需利用STATCOM/BESS快速调用BESS中储存的能量,使风电场仍具备频率响应能力。

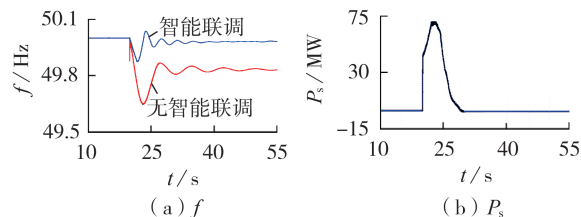


图4 频率响应与STATCOM/BESS有功输出
(桨距角控制区)

Fig.4 Frequency response and active power output of STATCOM/BESS(pitch angle control zone)

由图4(a)可见,风电机组无法参与系统调频时,若没有STATCOM/BESS为虚拟惯性提供补偿,系统缺少足够的能量弥补不平衡功率,频率降低明显,最低点达到了49.66 Hz,且最终稳定在49.82 Hz;加入STATCOM/BESS后,频率最低点显著上升,达到49.88 Hz,提升了0.22 Hz,且最终恢复至额定状态。由图4(b)可见,频率支撑全部由STATCOM/BESS承担,系统的虚拟转动惯量得到增强,从而频率得到了快速恢复。

5.4 λ_{soc} 对BESS补偿效果的影响

BESS是提供频率支撑的关键设备,其荷电状态是否满足条件,以及是否有足够的备用容量都会对系统频率支撑效果产生很大影响。前文的仿真结果均是在 λ_{soc} 满足要求且备用容量足够时给出。接下来将给出当风速为13 m/s(桨距角控制区)和STATCOM/BESS备用容量不足时的频率响应和STATCOM/BESS有功输出仿真结果,如图5所示。

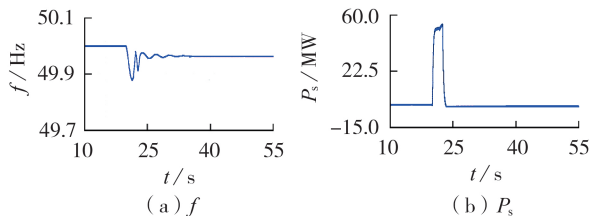


图5 频率响应与STATCOM/BESS有功输出
(备用容量不足)

Fig.5 Frequency response and active power output of STATCOM/BESS(reserve capacity is insufficient)

由图5可见,由于BESS备用容量不足,当检测到下一个控制周期 λ_{soc} 将低于下限20%时,BESS将降低其有效输出并快速进入停止放电状态,从而

确保 λ_{soc} 可以保持在规定的的安全范围内。因此,在22 s时,由于系统功率再次出现了失衡现象,频率发生了二次跌落,最终频率只能稳定在49.97 Hz。可见,足够的 λ_{soc} 可确保BESS能够提供足够的补偿。若在风电机组无法参与调频时 λ_{soc} 不足,则很有可能对系统频率稳定性造成二次伤害。因此,应尽量保证BESS具有足够的备用容量。

综上可见,所提控制方法的“智能”体现在:

(1)感知智能,即能灵敏地感知电力系统中的异常运行状态,对频率和电压的变化具有敏锐的感知能力;

(2)逻辑智能,即能进行有效的测量、推理、判断以及复杂的数学运算,并灵活执行决策指令;

(3)自我认知智能,即在控制过程中及控制周期结束后对系统相应参数进行及时修正,更新数据。

6 结论

本文针对风电并网系统在功率不平衡时频率与电压支撑能力不足的问题,基于STATCOM/BESS结合转子动能控制、风速分区、模糊逻辑控制研究风电并网系统频率与电压支撑的智能联调优化控制方法。

(1)针对风电大规模并网引起频率及电压耐受能力减弱的问题,提出STATCOM/BESS与风电机组智能联调控制的方法,可在功率不平衡期间为系统提供可靠的能量来源;

(2)基于模糊逻辑控制算法,根据当前频率特性,决定系统调频响应的功率需求,通过并网点电压的电压联调控制得到系统电压调节无功需求,动态决策风电机组与STATCOM/BESS的功率参考值,达到充分协调控制频率与电压的目的;

(3)在考虑BESS荷电状态的情况下,基于荷电状态反馈,STATCOM/BESS动态调节工作模式,防止BESS过度充放电,有效延长了BESS的使用寿命;

(4)针对负载突然增加导致频率波动的情况,案例分析表明,该方法可为频率提供有效支撑,且为风机并网点电压提供可靠补偿,进一步提高系统稳定性。

本文仅在理论及仿真方面对所提控制方法进行验证,尚需在更多的工程实际中进一步验证。后续研究可针对若在预知BESS备用容量不足的情况下,是否仍要利用BESS进行调频这一问题,进一步研究STATCOM/BESS与风电场的综合智能联调。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 黄伟,陈炜,吴军,等.基于功率平衡控制原理的双馈风电机组辅助调频方法[J].电力自动化设备,2019,39(1):66-72.
HUANG Wei, CHEN Wei, WU Jun, et al. Auxiliary frequency modulation method of DFIG-based wind turbine based on principle of power balance control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 66-72.

[2] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等.考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J].中国电机工程学报,2017,37(24):7108-7120,7425.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy system considering operational constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(24): 7108-7120, 7425.

[3] 凌禹,窦真兰.基于DVR的双馈风电机组不对称电压故障穿越[J].电力自动化设备,2019,39(2):65-70,77.
LING Yu, DOU Zhenlan. Asymmetrical voltage fault ride-through of wind turbine with DFIG using DVR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 65-70, 77.

[4] 邢鹏翔,付立军,王刚,等.改善微电网频率动态响应的虚拟同步发电机强化惯量控制方法[J].高电压技术,2018,44(7):2346-2353.
XING Pengxiang, FU Lijun, WANG Gang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator with enhanced inertia for improving dynamic frequency response of microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2346-2353.

[5] 高澈,田新首,李琰,等.基于运行状态评估的双馈风机自适应虚拟同步发电机控制[J].电网技术,2018,42(2):517-523.
GAO Che, TIAN Xinshou, LI Yan, et al. Adaptive virtual synchronous generator control of DFIG based on operation state evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 517-523.

[6] 李建林,郭斌琪,牛萌,等.风光储系统储能容量优化配置策略[J].电工技术学报,2018,33(6):1189-1196.
LI Jianlin, GUO Binqi, NIU Meng, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1189-1196.

[7] 靳雯皓,刘继春,刘俊勇.基于复合储能系统的微网联络线功率优化[J].电力自动化设备,2018,38(6):22-28,33.
JIN Wenhao, LIU Jichun, LIU Junyong. Microgrid tie line power optimization based on hybrid energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 22-28, 33.

[8] 张祥宇,杨黎,朱晓荣,等.光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J].电力自动化设备,2017,37(9):109-115.
ZHANG Xiangyu, YANG Li, ZHU Xiaorong, et al. Virtual rotational inertia control of PV generation system with energy storage devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 109-115.

[9] 夏鹏,刘文颖,朱丹丹,等.基于模型预测控制的多时间尺度无功电压优化控制方法[J].电力自动化设备,2019,39(3):64-70.
XIA Peng, LIU Wenying, ZHU Dandan, et al. Multi-time scale optimal control method of reactive power and voltage based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 64-70.

[10] 夏成军,王真,华夏,等.基于电压灵敏度的受端系统电压支撑强度评价指标[J].电网技术,2018,42(9):2938-2949.
XIA Chengjun, WANG Zhen, HUA Xia, et al. A voltage support strength index based on sensitivity for receiving end of HVDC system[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2938-2949.

[11] 李宁宁,王建斌,纪延超,等.基于改进比例控制的STATCOM/BESS直流侧功率动态分配方法[J].高电压技术,2016,42(1):112-120.
LI Ningning, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. Dynamic allocation method of DC side power based on improved ratio control for STATCOM/BESS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 112-120.

[12] 张强,张新燕,常喜强,等.BESS-STATCOM提高风火打捆直流并网稳定性[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(2):16-21.

- ZHANG Qiang, ZHANG Xinyan, CHANG Xiqiang, et al. Improvement of grid stability of wind-thermal bundled power system by BESS-STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(2): 16-21.
- [13] 刘青, 徐宏璐, 李权. 基于 STATCOM / BESS 强化风机 VSG 虚拟惯性的协同控制方法[J / OL]. 电力系统保护与控制. [2019-11-07]. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.190083>.
- [14] 程平凡, 曾成碧, 高选杰, 等. 基于 STATCOM / ESS 的光伏低压穿越控制策略[J / OL]. 电测与仪表. [2019-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20190422.1851.010.html>.
- [15] 郑治华. 多电平 STATCOM / BESS 协调控制风电场功率的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- ZHENG Zhihua. Research on the power of wind farm based on multilevel STATCOM / BESS coordinated control[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [16] 彭勃, 张峰, 梁军. 考虑风速分区的风-储系统短期频率响应协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 57-65.
- PENG Bo, ZHANG Feng, LIANG Jun. Coordinated control strategy for short-term frequency response of wind-energy storage system considering wind speed partition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 57-65.
- [17] 颜湘武, 徐韵, 李若瑾, 等. 基于模型预测控制含再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化[J / OL]. 电工技术学报. [2019-11-29]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181605>.
- [18] 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. Two-stage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 15-21, 29.
- [19] 熊锋俊, 杨俊华, 沈辉, 等. 基于纵横交叉算法的波浪发电装置最大功率跟踪控制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 124-130, 143.
- XIONG Fengjun, YANG Junhua, SHEN Hui, et al. The maximum power point tracking control based on crisscross optimization algorithm for wave power generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 124-130, 143.
- [20] 符杨, 黄丽莎, 赵晶晶. 基于风储协调控制的微电网平滑切换控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 55-61.
- FU Yang, HUANG Lisha, ZHAO Jingjing. Microgrid control strategy for smooth mode transfer based on coordination between double-fed induction generator and battery[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3): 55-61.
- [21] 李滨, 李倍存, 陈碧云. 含超前控制的风储系统滚动最优控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 25-34.
- LI Bin, LI Beicun, CHEN Biyun. Rolling optimal control strategy with lead control for wind power and energy storage systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 25-34.
- [22] 雷勇, 林晓冬. 超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 983-992.
- LEI Yong, LIN Xiaodong. Application of hybrid energy storage system based on SMES and BESS in smoothing the power fluctuations of wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 983-992.

作者简介:



刘青

刘青(1974—),女,河北石家庄人,副教授,博士,主要研究方向为柔性交流输电、电力系统安全防御与恢复控制(E-mail: hddl_liuqing781@163.com);

徐宏璐(1995—),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为柔性交流输电、新能源发电与并网稳定性控制(E-mail: deer136929789@163.com)。

(编辑 李莉)

Intelligent joint optimization control method for improving frequency and voltage support of STATCOM / BESS wind power system

LIU Qing, XU Honglu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To solve the frequency fluctuation and PCC(Point of Common Coupling) voltage rising or dropping caused by the sudden change of load in wind power system, an intelligent joint optimization control method based on STATCOM / BESS(STATIC synchronous COMPensator based on Battery Energy Storage System) is proposed. The method is divided into three layers in the implementation process, including real-time monitoring layer, dynamic decision-making layer and execution control layer. The three layers are closely connected to form a reliable closed loop. Firstly, in the real-time monitoring layer, the wind speed division and fuzzy control are used to judge the frequency modulation capability, active and reactive power demands. Secondly, in the dynamic decision-making layer, the inertia constant and PCC voltage are comprehensively considered to dynamically optimize active and reactive power allocation strategies by combining with the reactive power adjustable range of wind turbine. Finally, in the execution control layer, the wind turbine and STATCOM / BESS execute the power commands. When STATCOM / BESS strengthens the virtual inertia, the SOC(State Of Charge) of BESS is considered, its working mode is dynamically adjusted based on SOC feedback, and the relevant parameters are fed back in time. Simulative results show that the proposed method can effectively improve the dynamic response of frequency and voltage, and improve the frequency and voltage support.

Key words: wind power; STATCOM / BESS; intelligent joint control; frequency modulation capability; fuzzy logic; frequency support; voltage support

附录 A

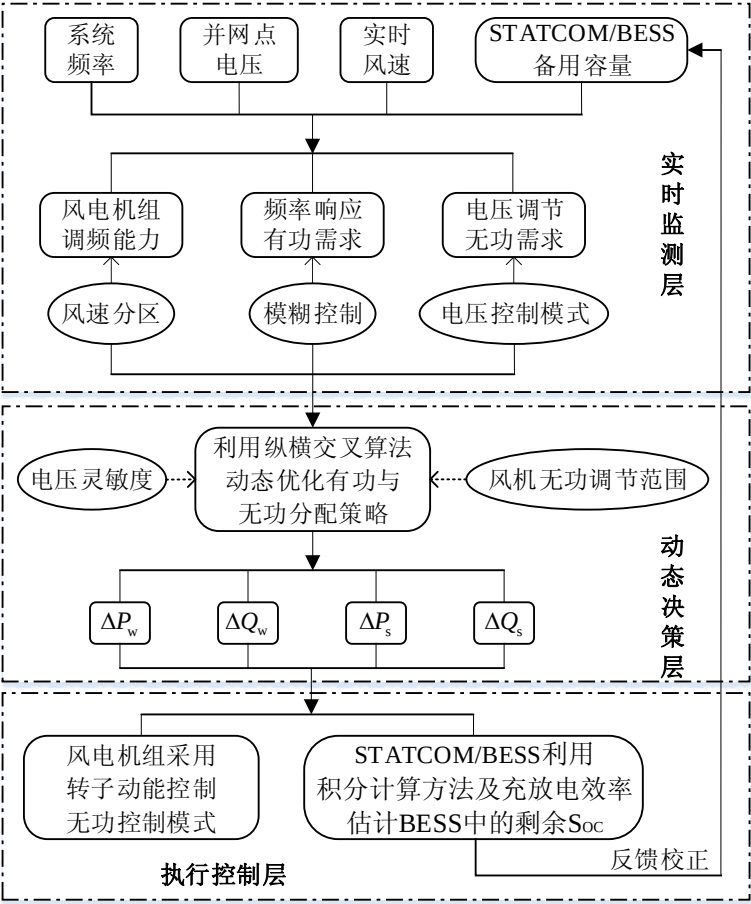


图 A1 智能联调控制结构

Fig.A1 Intelligent joint control structure

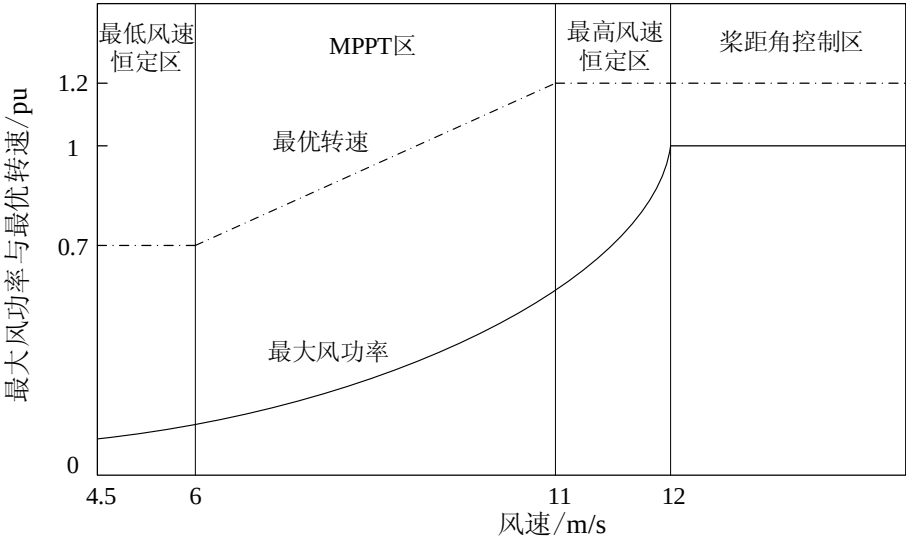


图 A2 风速区间示意图

Fig.A2 Schematic diagram of wind speed interval

附录 B

(1) 潮流方程约束。

$$\begin{cases} P_i = u_i \sum_{j=1}^n u_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = u_i \sum_{j=1}^n u_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (B1)$$

其中, n 为网络支路数; P_i 、 Q_i 分别为各节点注入的有功、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 与节点 j 间的电导、电纳。

(2) 控制变量约束。

$$P_{w.min} \leq P_w \leq P_{w.max} \quad (B2)$$

$$Q_{w.min} \leq Q_w \leq Q_{w.max} \quad (B3)$$

$$P_{s.min} \leq P_s \leq P_{s.max} \quad (B4)$$

$$Q_{s.min} \leq Q_s \leq Q_{s.max} \quad (B5)$$

$$U_{PCC.min} \leq U_{PCC} \leq U_{PCC.max} \quad (B6)$$

其中, $P_{w.max}$ 、 $P_{w.min}$ 分别为风机有功出力上、下限值; $Q_{w.max}$ 、 $Q_{w.min}$ 分别为风机无功出力上、下限值; $P_{s.max}$ 、 $P_{s.min}$ 分别为 STATCOM/BESS 有功输出上、下限值; $Q_{s.max}$ 、 $Q_{s.min}$ 分别为 STATCOM/BESS 无功输出上、下限值; $U_{PCC.max}$ 、 $U_{PCC.min}$ 分别为并网点电压上、下限值, 为满足要求, 将其设置为额定电压的 97%~107%。

此外, 风电机组与 STATCOM/BESS 增发的有功与无功功率应满足以下关系:

$$\Delta P_w + \Delta P_s = \Delta P_{ref} \quad (B7)$$

$$\Delta Q_w + \Delta Q_s = \Delta Q_{ref} \quad (B8)$$

附录 C

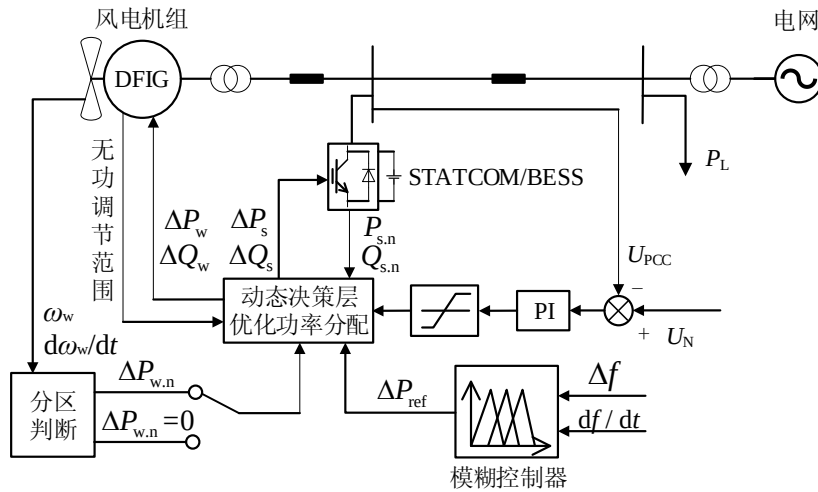


图 C1 频率与电压联调控制

Fig.C1 Frequency and voltage joint control

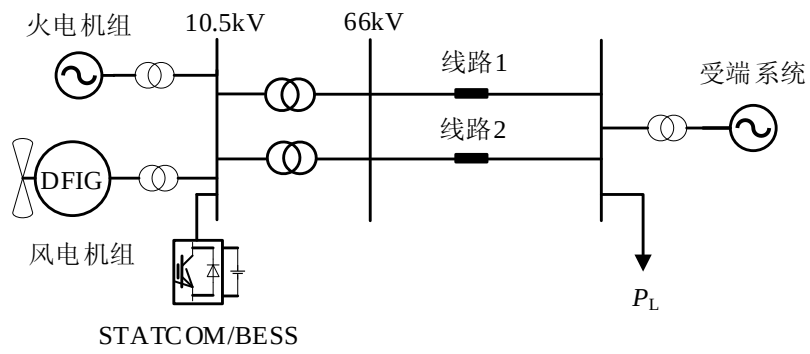


图 C2 STATCOM/BESS 风电系统模型

Fig.C2 Wind power system model with STATCOM/BESS access