

华北电力大学

专业硕士学位论文

不同控制下风机的惯量特性分析及惯量支撑 能力提升

**Analysis of inertia characteristics and improvement of
inertia support capacity of fans under different
controls**

周仲虎

2025 年 5 月

国内图书分类号：TK89

国际图书分类号：621.3

学校代码：10054

密 级：公开

专业硕士学位论文

不同控制下风机的惯量特性分析及惯量支撑 能力提升

硕 士 研 究 生： 周仲虎

导 师： 刘崇茹教授

企 业 导 师： 杨冬梅高级工程师

申 请 学 位： 能源动力硕士

专 业 领 域： 电气工程

培 养 方 式： 全日制

所 在 学 院： 电气与电子工程学院

答 辩 日 期： 2025 年 5 月

授予学位单位： 华北电力大学

Classified Index: TK89
U.D.C: 621.3

Thesis for the Professional Master's Degree

Analysis of inertia characteristics and improvement of
inertia support capacity of fans under different
controls

Candidate:	Zhou Zhonghu
Supervisor:	Prof Liu Chongru
Enterprise mentor:	Yang Dongmei Senior Engineer
Professional Degree Applied for:	Master of Energy and Power Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
Cultivation ways:	Full-time
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	May, 2025
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

随着新能源发电技术的快速发展，我国电力系统“风电入网降低系统惯量”现象日益凸显，主要表现为系统风电渗透率越来越高，且风电惯量水平不及传统同步机。这导致系统抗扰动能力较弱，低惯量系统发生功率扰动后系统频率下降问题会严重加剧，而过低的系统频率会引起风机脱网，影响风电消纳，威胁电力系统的安全稳定运行。针对上述问题，本文基于惯量支撑平均功率评估法分析了不同控制下风机的惯量特性，提出了考虑电池储能和超级电容充放电特性的联合储能惯量提升策略，取得了以下研究成果：

首先，从直驱风机机侧和网侧控制策略出发，分析了风机跟网型虚拟惯量控制和构网型虚拟惯量控制；从惯量源角度和惯量本质角度，明确了风机等效惯量的定义，并基于直驱风机跟网型虚拟惯量控制模型提出了风机等效惯量计算方法。

其次，提出了基于惯量支撑平均功率评估风机等效惯量的方法，对不同控制下的风机惯量特性进行了分析。基于风机惯量支撑功率约束条件，对比分析了同步机、两种跟网型虚拟惯量控制风机和构网型虚拟惯量控制风机的惯量支撑平均功率，惯量支撑平均功率对应的风机虚拟惯量控制参数；基于小信号模型，分析了不同控制下随着风电渗透率的变化含风机系统的频率响应特性，并基于 CIGRE 标准算例搭建仿真模型验证了分析的正确性。

最后，提出了一种考虑电池储能和超级电容充放电特性的联合储能惯量提升策略。分析了两种储能设备的惯量响应特性，在第三章跟网型虚拟惯量控制风机的基础上，提出了考虑电池储能和超级电容在惯量响应期间的充放电互补特性的系统惯量提升策略。此外，基于 PSCAD 搭建仿真模型，在三种不同工况下进行仿真验证，所提策略能够有效提升系统惯量水平，保障系统安全稳定运行。

关键词：虚拟惯量控制；风机等效惯量；电池储能；超级电容；联合储能

Abstract

With the rapid development of new energy power generation technology, the phenomenon of "wind power grid access to reduce system inertia" in China's power system has become increasingly prominent, which is mainly manifested in the increasing penetration rate of system wind power, and the level of wind power inertia is not as high as that of traditional synchronous machines. This leads to the weak anti-disturbance ability of the system, and the problem of system frequency decline will be seriously aggravated after the power disturbance of the low inertia system, and the system frequency that is too low will cause the wind turbine to go off the grid, affect the wind power consumption, and threaten the safe and stable operation of the power system. In order to solve the above problems, this paper analyzes the inertia characteristics of wind turbines under different controls based on the inertia support average power evaluation method, and proposes a joint energy storage inertia enhancement strategy considering the charging and discharging characteristics of battery energy storage and supercapacitors, and obtains the following research results:

Firstly, starting from the control strategies of the machine side and the grid side of the direct-drive fan, the virtual inertia control of the wind turbine with the grid type and the virtual inertia control of the network type were analyzed. From the perspective of the source of inertia and the essence of inertia, the definition of equivalent inertia of wind turbine is clarified, and the calculation method of equivalent inertia of wind turbine is proposed based on the virtual inertia control model of direct drive fan and grid type.

Secondly, a method for evaluating the equivalent inertia of the wind turbine based on the average power of inertia support is proposed, and the inertia characteristics of the fan under different controls are analyzed. Based on the constraints of the inertia support power of the wind turbine, the average power of the inertia support of the synchronous machine, the two grid-based virtual inertia control fans and the network-based virtual inertia control fan were compared and analyzed, and the range of the virtual inertia control parameters of the wind turbine under the same inertia support capacity was obtained. Based on the small signal model, the frequency response characteristics of the wind turbine system with the change of wind power permeability under different controls are analyzed, and the simulation model is built based on the CIGRE standard example to verify the correctness of the analysis.

Finally, a combined energy storage inertia enhancement strategy considering the charging and discharging characteristics of battery energy storage and supercapacitors is proposed. The inertia response characteristics of the two energy storage devices are analyzed, and on the basis of the grid-based virtual inertia control fan in Chapter 3, a system inertia enhancement strategy that integrates the complementary characteristics of

charge and discharge during the inertia response of the two energy storage devices is proposed. In addition, the simulation model is built based on PSCAD and verified under three different working conditions, and the results show that the proposed strategy can effectively improve the inertia level of the system and ensure the safe and stable operation of the system.

Keywords: virtual inertia control, Fan equivalent inertia, battery energy storage, supercapacitors, Combined energy storage

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及选题意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 风机虚拟惯量控制研究.....	3
1.2.2 风机惯量特性研究.....	4
1.2.3 风机惯量提升策略研究.....	5
1.3 本文的主要工作.....	6
第 2 章 风机典型控制及其等效惯量计算方法	8
2.1 引言.....	8
2.2 直驱风机典型控制.....	8
2.2.1 直驱风机控制.....	9
2.2.2 跟网型直驱风机虚拟惯量控制.....	10
2.2.3 构网型直驱风机虚拟惯量控制.....	11
2.3 风机等效惯量计算方法.....	12
2.3.1 风机等效惯量的定义.....	12
2.3.2 直驱风机等效惯量计算方法.....	12
2.4 本章小结.....	14
第 3 章 不同控制下风机的惯量特性分析	15
3.1 引言.....	15
3.2 能量角度评估惯量特性.....	15
3.2.1 风机惯量支撑功率约束.....	15
3.2.2 惯量支撑平均功率估算.....	21
3.2.3 不同控制下系统频率响应特性.....	25
3.3 仿真分析.....	27
3.3.1 风电渗透率为 25%时仿真结果	28
3.3.2 风电渗透率为 50%时仿真结果	29
3.4 本章小结.....	30
第 4 章 直驱风机惯量支撑能力提升策略	31
4.1 引言.....	31
4.2 考虑电池储能的风机惯量提升策略	31
4.2.1 锂离子电池储能运行机理及其特性	31
4.2.2 考虑锂离子电池储能的风机直流侧控制	33
4.3 考虑超级电容储能的风机惯量提升策略	36
4.3.1 超级电容器运行机理及其特性.....	36

4.3.2 考虑超级电容器的风机直流侧控制37

4.4 联合储能风机惯量提升策略38

4.5 仿真分析.....40

4.5.1 电池储能与超级电容的风机惯量提升对比分析40

4.5.2 联合储能风机惯量提升效果分析.....44

4.6 本章小结.....49

第 5 章 结论与展望50

5.1 结论.....50

5.2 展望.....50

参考文献.....52

第1章 绪 论

1.1 研究背景及选题意义

随着化石能源短缺危机日益严峻，全球能源体系正经历深刻转型，各国纷纷加大对风能、太阳能等可再生能源的投入力度。我国风能资源禀赋优越，具备广域分布、储量丰沛等特征，风力发电凭借清洁无污染、成本可控、调度灵活等核心优势，已成为能源转型的重要支柱产业^[1]。近年来，在技术革新与政策扶持的双重驱动下，我国风电产业实现跨越式发展。据国家能源局数据显示，2024 年 1-10 月全国风电装机容量已达 4.9 亿千瓦，同比增长 20.3%，发展势头强劲。

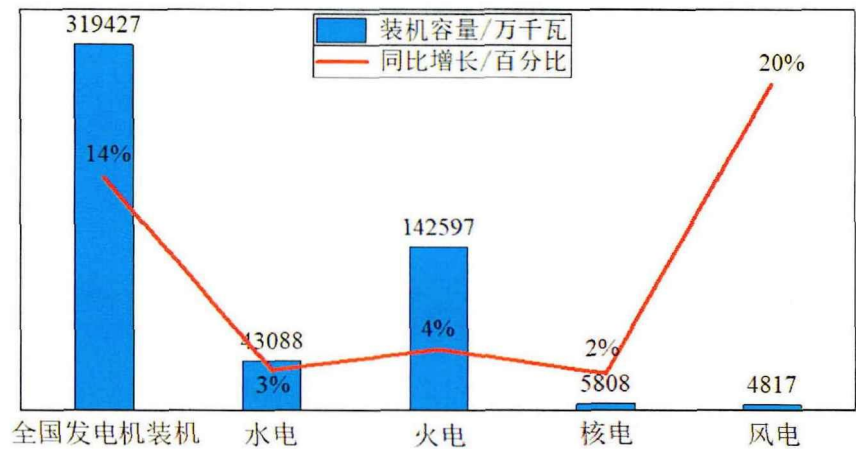


图 1-1 2024 年 1 月至 10 月我国发电装机容量

随着风电渗透率的持续提升和传统同步机组的逐步退出，现代电力系统的动态特性发生结构性改变，由此引发的惯量支撑力弱化问题已成为威胁电网安全稳定运行的重要隐患，尤其在系统频率稳定性方面表现尤为突出^[2-4]。传统电网的惯量支撑主要源自同步发电机组转子的机械旋动能，其物理特性决定了同步机组转速与电网频率的强耦合关系。当系统遭遇功率扰动时，同步机组可通过电磁功率的自调节机制，自主释放或存储转子动能进行动态平衡，这种固有惯性响应特性为系统频率稳定提供了重要保障。

然而，大规模并网的风力发电机组因其并网方式与运行特性的本质差异，导致系统等效惯量水平显著降低。具体而言，风电机组普遍运行于最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking，MPPT）模式，这种运行方式使得机组转速与电网频率完全解耦^[5]。尽管风电机组自身具有可观的旋转动能，但由于其转子动能无法通过传统电磁耦合方式参与系统动态调节，导致风电机组的机械惯量难以转化为有效系统惯量。研究表明，当风电渗透率提高时，系统等效惯量将呈现加

速衰减趋势^[6,7]。这种惯量支撑能力的持续弱化直接导致系统频率变化率（Rate of Change of Frequency，RoCoF）显著增大，在发生大功率缺额故障时极易引发频率崩溃事故，严重威胁新型电力系统的安全稳定运行。例如，巴西 2023 年 8 月 15 日大停电：东北部电网因新能源（风电、光伏）占比过高（87.2%），常规机组调频能力不足，导致频率崩溃和大规模脱网^[8]。英国 2019 年 8 月 9 日大停电：大停电发生前，风机等新能源装机比例大约为 40%，运行中的传统同步机仅占总开机容量的 50%，雷击故障造成燃气机组跳闸后，风电因耐受低频能力不足脱网，系统惯量下降引发频率骤降。本次事故中，风电场、燃气机组等叠加脱网，累计造成有功缺额 1691MW，触发低频减载造成大量用户停电^[9]。

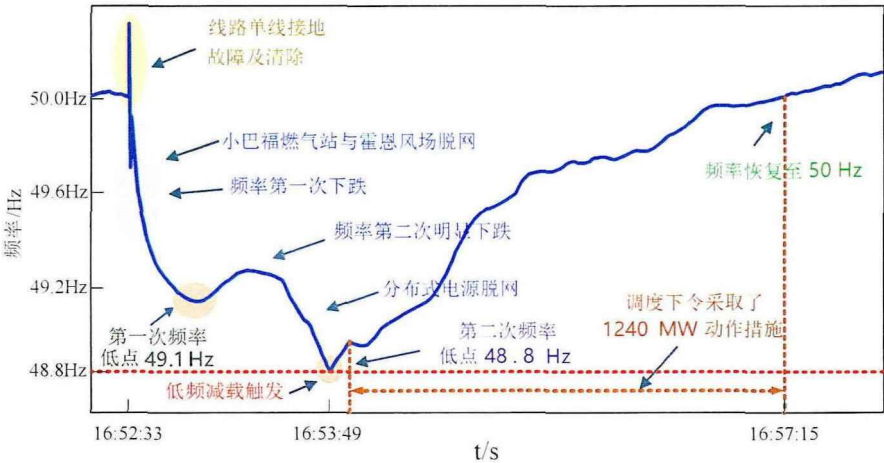


图 1-2 英国“8.9”大停电演化过程

为了保障风电大规模接入电网后安全稳定运行，增强高风电渗透系统的稳定性与抵御风险的能力，研究不同控制下风机的惯量特性及惯量提升策略具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

物理上，惯性被定义为一个物体阻碍其状态变化的能力，这种惯性的度量被称为惯量。传统电力系统中，由水轮机或者汽轮机驱动的同步机占主导地位，系统中发生功率扰动时，可以直接和同步机转子进行能量交换，使得系统抗扰能力较强。但随着系统中新能源渗透率不断提高，一方面传统同步机代表的强频率韧性的传统惯量源不断下降，另一方面风机、光伏等各种新的异质惯量资源拓宽了新能源高渗透率系统的惯量能量来源，当系统突发功率扰动时，系统频率特性已经发生了巨大变化。针对该问题大量学者从风机的典型虚拟惯量控制、风机惯量特性分析及惯量提升策略等展开了研究。

1.2.1 风机虚拟惯量控制研究

对于直驱风机的虚拟惯量控制而言，国内外学者已经开展了深入研究。文献[10]详细介绍了目前主流的四类风电机组类型：恒速恒频异步风机、转子电阻型异步风机、双馈异步风机、永磁直驱风机。文献[11]对直驱风电机组构成结构进行了详细介绍，直驱式风电机组系统架构包含风力机、永磁同步发电机（permanent-magnet synchronous generator，PMSG）及全功率变流器，通过并网变压器实现电网接入，其控制相比于其他类型风机较为简单。目前，直驱风电机组惯量支撑控制可分为两类：跟网型控制和构网型控制。文献[12]对跟网型控制和构网型控制进行了区分：跟网型控制通过控制矢量电流改变换流器输出电流，从而调节馈入电网的有功和无功功率，通过锁相环（Phase-Locked Loop, PLL）实现变流器与电网同步；构网型控制将换流器控制成电压源，并通过控制换流器自身输出功率来实现同步。文献[13]对永磁直驱风机进行数学建模并分析其工作原理，详细推导了跟网型和构网型永磁直驱风机的全功率换流器控制方程。

风机采用跟网型虚拟惯量控制可以参与系统惯量响应，在不增加储能等附属设备的情况下使风机具备一定的惯量支撑能力，可以增强风电并网系统的频率稳定性^[14]。文献[15]建立了风电并网系统虚拟惯量跟网控制的模型，并对虚拟惯量控制的机理进行了分析，并从能量的角度分析了风机和传统发电机之间的协调控制，有效提高了系统频率的惯量水平。针对跟网型虚拟惯量控制，大多数研究在机侧控制器附加功率控制器实现其控制方式，文献[14]提出了一种 RoCoF 下垂控制策略，该控制策略在传统频率偏差下垂控制中将扰动产生的不平衡功率对应的频率偏差通过微分控制器来提升其响应速度。

风机构网型虚拟惯量控制方面，国内外学者已提出多种构网型控制的具体实现策略，包括直流电容惯性同步控制^[17-20]、虚拟同步控制^[21-24]、下垂控制^[25-29]、虚拟振荡器控制^[30]等。从风机单机角度，文献[31]将直流电容惯性同步控制应用于风电机组，分析了网侧换流器与传统同步发电机各变量之间的对应关系，揭示了直流电容惯性同步原理。将该方法推广至场站层面，可以在受端换流站利用直流母线电容固有动态特性实现无锁相环自主电网同步控制，使得直流母线电压与大电网频率具有实时联动特性，通过送端换流站的频率镜像控制可将电网频率实时镜像到风场侧，便于风场进行惯量响应^[32]。

综上所述，国内外学者对直驱风机跟网型虚拟惯量控制和构网型虚拟惯量控制已有非常丰富的研究，对构网型虚拟惯量控制和跟网型虚拟惯量控制下风机的惯量特性对比分析具有一定的参考价值。

1.2.2 风机惯量特性研究

对于风机惯量特性而言，国内外学者已经开展了深入研究。首先是对风机等效惯量的定义。经典的电力系统惯量是在旋转动力学框架下提出的，随着风电等异质惯量源的广泛接入，惯量定义演变到广义惯量的概念。文献[33]介绍了同步机的惯量能量仅来源于转子动能，而直驱风机的惯量能量来源于主轴动能、电容电场能、降载能量等，拓展了系统等效惯量的来源。文献[10]提出电力系统广义惯性是同步机调速器时间尺度以内全网各类资源抵抗系统频率变化的性质，从而衡量同步机惯量响应阶段内影响系统频率变化的所有因素贡献。文献[34,35]指出，从能量角度看，广义惯量刻画了各类能量抵抗由电源、负荷侧有功扰动引起频率变化的能力，包括接入系统的动能、电磁能、电能、电化学能等，这对应了风机的惯量能量来源。文献[36]认为等效惯量仅包含旋转惯量，但文献[37,38]认为等效惯量包括旋转惯量和各类异质资源的虚拟惯量。综上，“等效惯量”在不同研究场景中赋予了不同的定义，因此依据本文研究目标，需要对风机等效惯量做进一步的明确定义。

其次是风机等效惯量的评估，国内外也有一定的研究基础。现有研究中，等效惯量评估从基础方法的角度出发，可以归位四大类：参数辨识法^[39-41]、直接计算法^[42,43]、模态分析法^[44-46]、数据关联法^[47,48]。参数辨识法要结合风电机组详细模型进行建模，模型阶次选择、惯量降阶等对计算精度影响很大，且工作量较大；模态分析法不依赖扰动工况，但其研究对象限于同步机主导系统，在风电高渗透率系统中应用较少；数据关联法的相关研究中，大多都是针对旋转惯量进行，很少涉及虚拟惯量的研究。直接计算法方面，文献[49]从能量变化角度推导了机端频率波动下的风电场惯量参数计算公式，但需要详细的全场内所有风电机组内部的参数和运行状态，工作量较大。文献[50]分析了含风电虚拟惯性响应的电力系统等效惯性时间常数的计算方法，并分析了风机等效惯量的时变特性，但未进行单机惯量的评估。文献[51]建立了含虚拟惯性控制的风电机组简化模型和风电场模型，计算求得了惯性时间常数的频域和时域解析解，但未进行下一步惯量评估的工作。综上，目前惯量研究领域研究方法繁多，但大多数方法底层模型不统一，模型过于简化或搭建模型工作量繁重，且有些方法对风电高渗透场景适用性不高。因此，对于高风电渗透率场景下的风机惯量评估方法还需深入研究。

最后，风机惯量评估还涉及风电机组的自身的一些约束条件，包括稳定性约束和惯量能量来源约束等。文献[52]提出了基于转子动能与分布式储能风机调频控制策略，认为转子动能是虚拟惯量功率支撑来源，但未讨论直流环节电容能量。文献[53]建立了直驱永磁同步风力发电机组的数学模型，采用特征值分析法，对系统小干扰稳定裕度进行了讨论。文献[54]对风电机组进行特征值灵敏度分析，

得到了影响直驱风电系统稳定性最明显的参数，并优化参数从而改善了系统的稳定性。现有惯量评估研究中，风机转子动能约束和稳定性约束相关内容较多，在本文惯量评估研究内容中具有一定的参考价值。

1.2.3 风机惯量提升策略研究

国内外对风机惯量提升策略的研究已取得了显著的进展，对于惯量提升的策略，主要集中在三个方面：一是优化虚拟惯量控制；二是风机并网点加入能提供惯量支撑的设备，和风机功率形成互补；三是风机直流环节加入储能设备（超级飞轮、超级电容、蓄电池储能等）。

对于虚拟惯量控制优化方面而言，文献[55]主要研究了改进 MPPT 的控制方法，将扰动传递到 MPPT 控制中，使转子动能变化补偿到系统来增大系统的虚拟惯量。文献[56]研究了改进的 PD 控制，将转速保护控制引入了系统中，有效地防止了系统频率二次跌落。文献[57]将系统的直流电压与电网频率建立联系，使附加惯量补偿与直流电压的进行联合控制达到优化的效果。但风机虚拟惯量控制的能量来源受限，不能给系统提供较大幅度的惯量支撑。另外一些研究在风机并网点直接附加储能设备，风速波动或者功率波动时可以和风机功率互补以提高系统惯量水平^[58-60]。

此外，在风机直流环节附加储能设备是目前研究方向的主流之一，具体是在直流环节的电容上并联超级电容、电化学电池储能、飞轮储能等。

针对电池储能而言，现有研究多是优化了电池储能的控制策略，以实现相应的功率支撑功能。文献[61]分析了磷酸铁锂电池工作特性，并在多种电池模型中选择并建立了二阶 Thevenin 模型的作为锂离子电池等效模型。文献[62]提出 SOC 状态反馈控制法，使电池储能深入参与电力系统频率调控。文献[63]提出了一种混合型自适应控制策略，是一种考虑电池荷电状态 SOC 状态变调节系数的控制策略，防止储能电池的过充过放。文献[64]提出基于模糊控制策略的电池储能系统辅助 AGC 调频的方法，以区域控制偏差及其变化率调节电池储能系统的输出功率，改善电网的动态调频性能。

超级电容方面，文献[62]详细分析了超级电容的工作原理，建立了超级电容的 RC 等效电路模型，结合其模型输出特性，分析了超级电容充放电特性。超级电容能在瞬时释放较大的功率，文献[63]提出了将超级电容器储能作为系统功率扰动后快速反应的“虚拟惯性”，从而阻止了频率跌到低频减载阈值，提高了孤岛电力系统频率稳定性。文献[64]将风机转子动能和超级电容同时作为虚拟惯量源，通过虚拟惯性控制有效地提高了对系统功率扰动的响应能力，提高了风电并网下系统频率的稳定性。

锂离子电池充放电稳定，超级电容可以瞬时输出大功率，充放电速率较快，

结合两者特性，可以建立联合储能系统用于提升系统惯量水平。文献[65]建立了蓄电池和超级电容的等效电路模型，讨论了混合储能系统的主体结构，设计了一种基于混合储能系统功率的初次分配和超级电容荷电状态（SOC）实时情况的混合储能系统能量管理方法，并进行了仿真验证。文献[66]提出了基于惯量支撑能力的蓄电池与超级电容功率分配策略，仿真验证了该策略在多种工况下具有惯量支撑能力。文献[67]针对混合储能系统功率分配和超级电容 SOC 恢复之间存在矛盾的问题提出一种基于虚拟阻抗和虚拟电压源的分布式控制策略，减少了 SOC 恢复过程及时对正常功率波动补偿效率的影响。文献[68]提出一种混合储能系统惯性控制策略，实现了控制混合储能系统产生虚拟惯性来更好地维持直流母线电压稳定。

综上所述，对于风机惯量提升策略，大多数研究考虑风机并网点加装储能设备和风机直流环节加装超级电容，对于电池储能和超级电容在惯量响应期间的功率特性互补缺少理论分析；由于系统扰动发生时，瞬间功率需求大，对于电池储能而言，能够瞬时提供的功率较小，因此需采用超级电容提供瞬时大额功率。但超级电容短时释放完功率后以及恢复充电时，系统还面临功率缺额，容易引起频率二次跌落，需要电池储能协助支撑频率。因此，亟须研究电池储能和超级电容惯量协调支撑控制策略。

1.3 本文的主要工作

本文针对风电入网后系统惯量水平下降问题展开研究，深入探讨了现有风机的虚拟惯量控制策略，并分析了风机等效惯量的定义和计算方法，定义了惯量支持平均功率，提出了基于该功率的风机惯量水平评估方法，在此分析基础上，结合电池储能和超级电容充放电特性，提出一种联合储能惯量提升策略，具体研究工作如下：

第 2 章从风机系统换流器控制策略出发，分析了跟网型和构网型虚拟惯量控制直驱风机的惯量控制策略。同时，从惯量源角度和惯量本质角度出发，详细分析了直驱风机惯量响应过程中惯量能量的来源，并明确了风机等效惯量的定义，最后基于直驱风机跟网型虚拟惯量控制模型提出了风机等效惯量的计算方法，为后续不同控制下风机的惯量特性分析奠定了理论基础。

第 3 章提出了基于惯量支撑平均功率的风机等效惯量评估方法，基于该方法对不同控制下的风机惯量特性进行了分析。首先，明确了风机惯量支撑功率的约束条件，基于平均功率法，对比分析了同步机、跟网型和构网型虚拟惯量控制风机的惯量支撑平均功率，分析得到同等惯量支撑能力下的控制参数范围，并分析了两种控制下系统的惯量动态特性，最后基于 CIGRE 标准算例搭建仿真模型，验

证了分析结论的正确性。

第 4 章提出了一种考虑电池储能和超级电容充放电特性的联合储能惯量提升策略。首先分析了电池储能和超级电容的运行机理和充放电特性，分别提出了两种储能设备的控制策略；基于电池储能和超级电容在惯量响应过程中的互补特性，提出了考虑两种储能设备在惯量响应期间的充放电互补特性的系统惯量提升策略。最后，基于 PSCAD 搭建仿真模型，在三种不同工况下进行仿真验证，结果表明，所提策略能够有效提升系统惯量水平。

第 5 章，总结与展望。

本文的技术路线如图 1-3 所示。

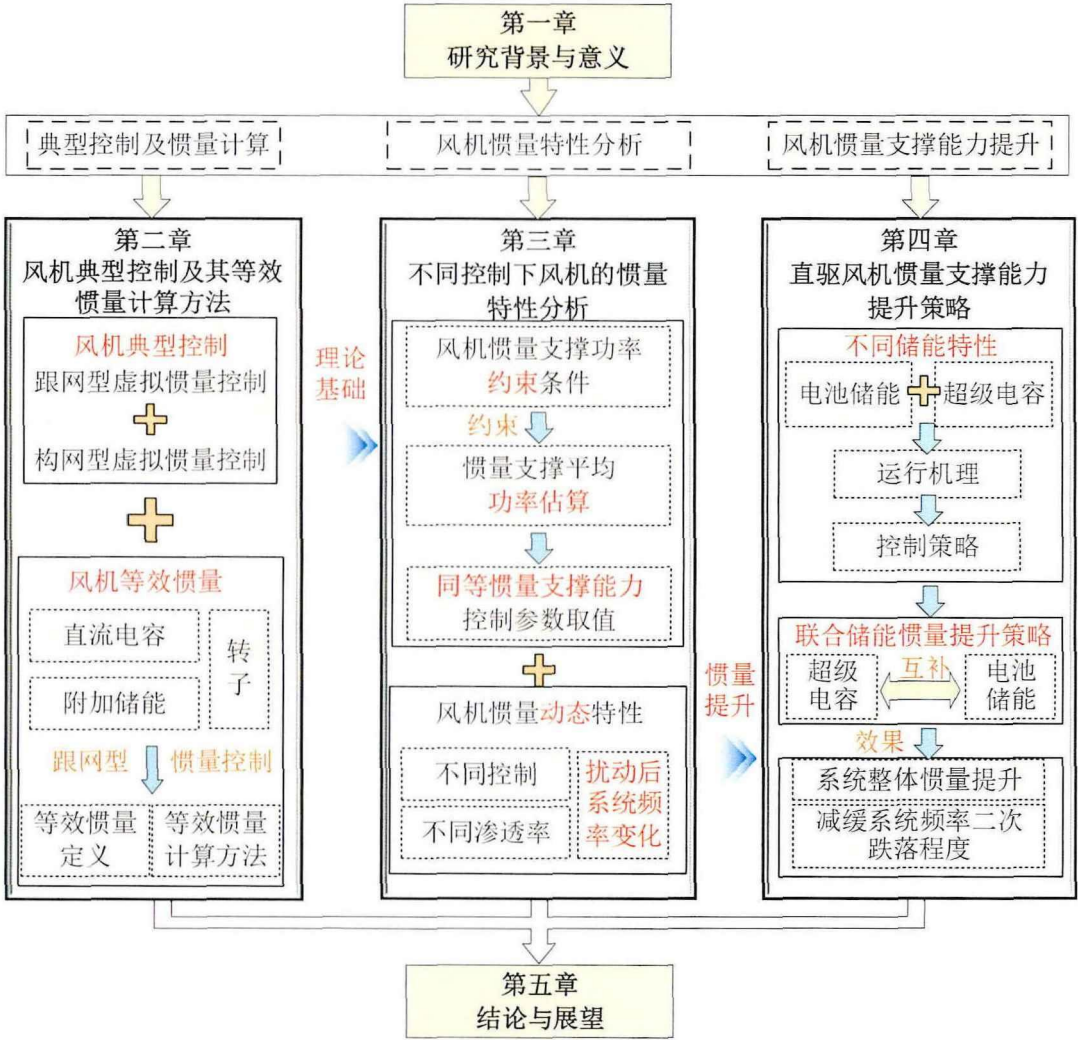


图 1-3 本文研究思路

第2章 风机典型控制及其等效惯量计算方法

2.1 引言

为分析不同控制下风机的惯量特性，对直驱风机系统结构行了简单的介绍，概述了机侧和网侧变流器采用的传统控制机理，并介绍了跟网型和构网型直驱风机虚拟惯量控制策略。为计算直驱风机等效惯量，明确了风电等效惯量的定义，并以跟网型虚拟惯量控制的直驱风机为例，详细推导了直驱风机等效惯量的计算方法。

2.2 直驱风机典型控制

本文研究对象为永磁直驱风机系统，其电气系统和控制系统结构如图 2-1 所示。

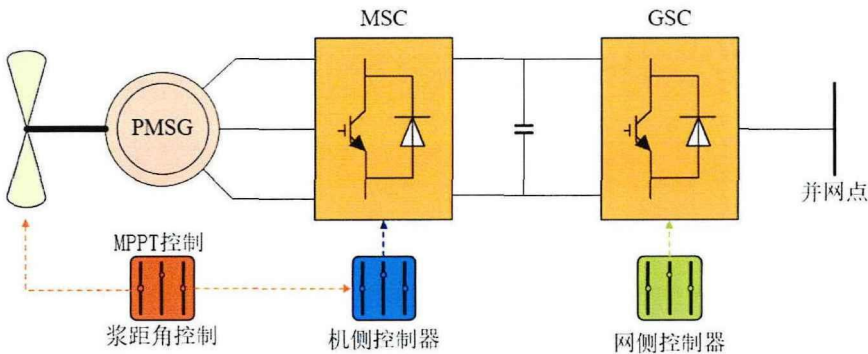


图 2-1 永磁直驱风机系统结构

如图 2-1 可知，该系统电气部分采用直流电容对称布局：左侧配置永磁发电机与机侧变流器，右侧为网侧变流器、电网，两组变流器与电容构成背靠背换流架构。系统工作原理如下：当风速超过给定值时，风力驱动风机叶片旋转，将风能转化为机械能，进而带动永磁发电机转子切割磁感线产生交流电，完成风能-电能转换。为保障电网稳定，机侧变流器先将发电机输出交流电整流为直流电，经网侧变流器逆变为 50Hz 工频交流电，最后输送至系统。风速在一定范围的变化，可经桨距角控制调节，使风机转速趋于稳定；MPPT 控制可实现风机最大功率跟踪，最大化风机的功率输出。

采用背靠背换流架构既可抑制并网谐波，又能隔离电网对发电机的直接影响，但若不采取相应的控制措施，风机在系统受到功率扰动时，不能对系统进行惯量支撑。

2.2.1 直驱风机控制

永磁直驱风机控制系统主要由机侧控制器及网侧控制器构成。其中，机侧控制器采用整流控制策略，将发电机输出的交流电转换为稳定直流电；网侧控制器则基于逆变控制调节直流母线电压，输出幅值频率稳定的 50Hz 工频交流电，从而保障系统可靠并网。

2.2.1.1 机侧变流器控制

在永磁直驱风机系统中，机侧变流器承担永磁发电机交流电整流为直流电的任务，还可以通过调节交轴电流控制电磁转矩以实现风机最大功率追踪。现有控制方法多采用双闭环 PI 矢量控制策略，该策略通过对定子电流解耦简化永磁电机控制模型，从而提升系统稳定性。采用此控制方案时，发电机定子电流完全用于转矩分量供给，且因交直轴正交特性，有效消除定子电流与永磁体间的耦合干扰及直轴去磁效应，兼具控制简洁性与工程实现优势。

在永磁直驱风机机侧变流器双闭环控制系统中，外环采用转速闭环架构，通过比对实际转速与 MPPT 控制器输出的转速指令信号实施负反馈调节，驱动风机运行于最优工况点。内环构建电流闭环机制，对 d-q 轴电流分量进行独立控制，将发电机输出的交流电整流为稳定直流电，改善电压波形质量并增强系统稳定性，具体控制逻辑如图 2-2 所示。

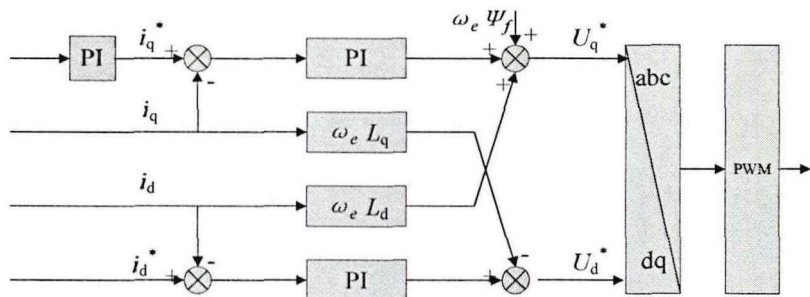


图 2-2 机侧变流器控制系统策略框图

2.2.1.2 网侧变流器控制

永磁直驱风机系统输出的电能经机侧换流装置整流后，由网侧换流装置逆变为工频交流电输送至电网。网侧控制器核心功能在于维持直流母线电压稳定，并通过功率因数控制实现并网。其控制策略沿用双闭环 PI 矢量架构：外环采用电压闭环，通过比较直流母线参考电压与实际电压偏差生成电流指令；内环构建电流闭环，对 d-q 轴电流分量实施精确控制，最终完成交流-直流转换过程。

网侧变流器外环采用直流电压与无功功率双目标控制，通过协调电压输出与母线电压稳定保障系统平稳并网。其拓扑结构优化可有效抑制网侧谐波，提升设备运行可靠性。内环基于 d-q 轴电流分量构建控制回路，通过精确调控电流分量，既可优化外环电压调节性能，又能有效降低谐波。具体控制逻辑如图 2-3 所示。

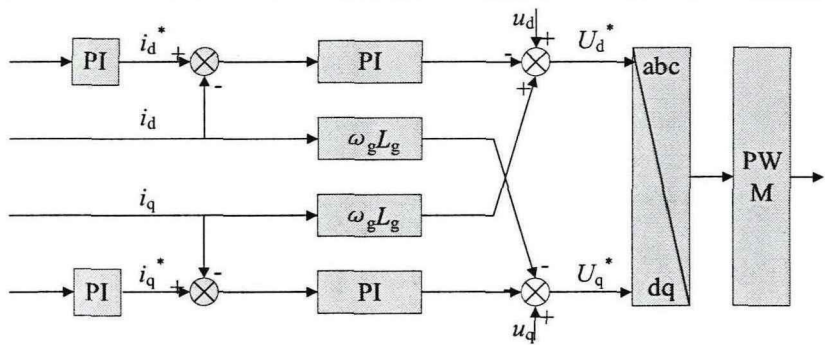


图 2-3 网侧变流器控制系统策略框图

2.2.2 跟网型直驱风机虚拟惯量控制

PD 虚拟惯量控制通过在风电机组传统最大功率跟踪控制框架中嵌入与频率偏差比例-微分项相关的附加功率支撑，模拟同步发电机的惯性响应特性及一次调频能力。当电网频率发生跌落时，该控制策略可通过释放转子储能参与电网频率调节，其控制机理表现为：依据频率偏差生成动态功率需求指令，利用比例-微分调节器实时调整输出功率，有效提升系统频率稳定性。风电机组通过 PD 虚拟惯量控制提供的辅助功率为：

$$P_{VIC} = -K_p \Delta\omega - K_d \frac{d\Delta\omega}{dt} \tag{2-1}$$

式中：\$K_p\$、\$K_d\$ 分别为 PD 虚拟惯量控制的比例系数和微分系数；\$\Delta\omega\$ 为系统角频率偏差。

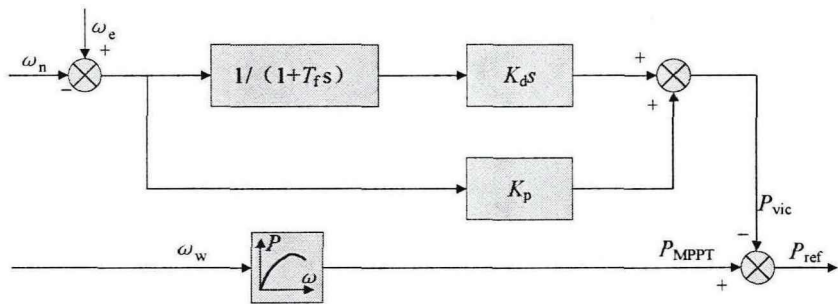


图 2-4 跟网型虚拟惯量控制原理图

图 2-4 展示了风电机组 PD 虚拟惯量控制原理。图中定义系统额定角频率为 \$\omega_n\$，实测角频率为 \$\omega\$，风力机转速对应 \$\omega_w\$，\$P_{ref}\$ 为风电机组并网功率 \$P_w\$ 的参考值。\$P_{MPPT}\$ 为经最大功率跟踪控制获取的机械功率，可以用下式表示：

$$P_{MPPT} = 0.5 \rho \pi r^5 C_{p_max} \omega^3 / \lambda_{opt}^3 = K_{max} \omega^3 \tag{2-2}$$

其中 \$K_{max}\$ 为使风力机输出功率达到最大值的系数，\$\rho\$ 为空气密度，\$r\$ 为叶片半径，\$C_{p_max}\$ 为风能捕获系数最大值，\$\lambda_{opt}\$ 为叶尖速比。忽略机组损耗后，风机虚拟惯量控制输出的功率表达式可写为：

$$P_{ref} = P_{MPPT} + P_{VIC} \quad (2-3)$$

2.2.3 构网型直驱风机虚拟惯量控制

本文构网型直驱风机采用直流电容惯性同步控制。风机机侧换流器采用基于转子磁链定向的矢量控制策略，网侧换流器则采用惯性同步控制技术。

根据图 2-1，背靠背换流器的直流母线电压方程可以描述为：

$$2H_c \frac{dU_{dc}}{dt} = P_m - P_e \quad (2-4)$$

式中： P_m 为风机机侧换流器输出功率； P_e 为风机网侧换流器输出功率； U_{dc} 为直流电压； H_c 为直流环节电容的惯性时间常数。

“惯性同步”原理可以用图 2-5 说明。各变量的对应关系为：直流电压 U_{dc} 对应角频率 ω_m ，直流侧电容惯量时间常数 H_c 对应同步机惯量时间常数 H_J 。

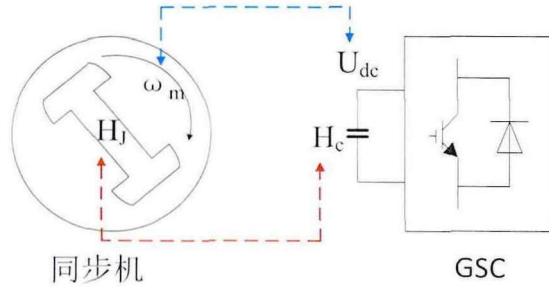


图 2-5 各变量对比关系

由式（2-4）和图 2-5，如果直流侧电压和网侧交流电压角频率取标么值时，它们是相等的关系。因此，直流电容惯性同步控制不需要锁相环 PLL 即可将网侧频率及时传送到机侧换流器。

如图 2-6，在网侧控制环路中，为实现直流电压和网侧输出角频率关联，将直流侧直流电压标么值 U_{dc} 输入积分器，其输出相位角 θ 用于生成 PWM 调制信号，从而建立直流电压 U_{dc} 与网侧输出角频率的同步关系。机侧换流器控制回路同样采用矢量控制架构。由图 2-5 可知，“惯性同步”控制等效惯量源于直流侧电容，但惯量支撑能量较小。为提升网侧换流器对电网的惯量支撑能力，需调用风机系统储存的旋转动能。为此，在机侧换流器最大功率跟踪环节引入惯量传递控制环节：将直流电压标么值 U_{dc} 经低通滤波器后，通过增益为 K_c 的微分环节处理，再将结果叠加至 MPPT 参考信号。该滤波器主要用于抑制高频分量经微分环节放大产生的扰动，在惯量响应时间尺度内可忽略其对控制的影响。

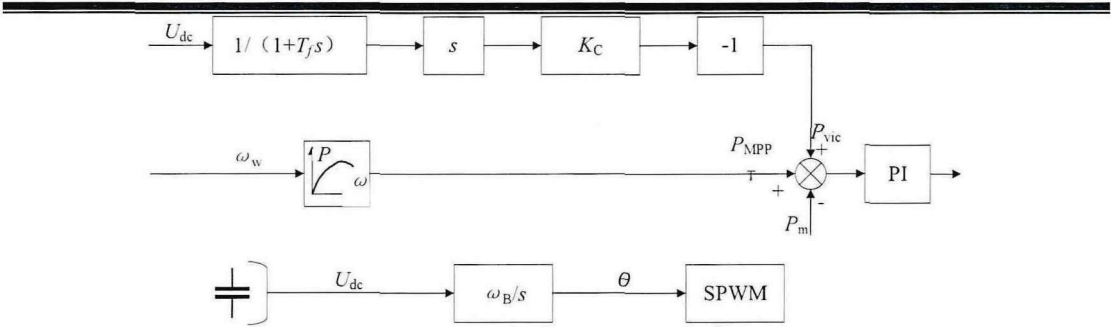


图 2-6 构网型虚拟惯量控制原理图

2.3 风机等效惯量计算方法

同步机惯量时间常数是一个常数，其大小取决于同步机的转子质量。风机等效惯量由于涉及到虚拟惯量控制，因此其虚拟惯量时间常数是一个变化的量，因此需要对风机等效惯量做一个明确的定义，并给出合适的计算方法。

2.3.1 风机等效惯量的定义

惯性是某类物体、系统、组织维持某种特定状态不变的性质。惯量是惯性的量度，描述了研究对象维持自身状态能力的强弱。经典的电力系统惯量是在旋转动力学框架下提出的。随着风机等新能源的广泛接入，系统中惯量能量来源也获得了拓展。风机直流环节的电容、风轮、主轴、附加的电池储能、附加的超级电容储能等都能提供惯量能量。

电力系统广义惯量可以定义为：在系统主要调频手段发挥作用前，系统各类资源借助动能、电磁能、电场能、电化学能等能量在系统有功不平衡时维持频率不变/抵抗频率变化的能力^[33]。因此，本文风机等效惯量可以定义为：系统发生功率扰动后，在惯量响应期间内，利用风机转子和叶轮、直流电容、附加储能等抵御系统频率变化的能力。

2.3.2 直驱风机等效惯量计算方法

本节以跟网型直驱风机虚拟惯量控制为例，计算其等效惯量时间常数。构网型虚拟惯量控制的直驱风机的等效惯量时间常数计算过程与其类似。

不同于传统同步机发电机，跟网型虚拟惯量控制直驱风机的惯量时间常数会随着时间发生变化，考虑工程实际，风机的惯量响应时间 T_w 可与系统惯量响应主导阶段的时间尺度大致一致。

跟网型风机通过附加控制以功率注入形式为系统提供惯量支撑。其惯量时间常数定义为直驱风机虚拟惯量时间常数 H_{eq} ， H_{eq} 为风机额定转速时风机系统储存能量 E_k 与额定容量 S_n 的比值，可以由式（2-5）表示：

$$H_{eq} = \frac{E_k}{S_n} = \frac{J_{eq}\omega_e^2}{2n_p^2 S_n} \approx \frac{\Delta\omega_r\omega_{r0}\omega_{e0}}{\Delta\omega_e\omega_{nom}^2} H_w \quad (2-5)$$

式中： J_{eq} 为直驱风电机组虚拟转动惯量； n_p 为直驱风机极对数； H_w 为风机固有惯性时间常数； ω_{nom} 为风机额定角速度； ω_{r0} 为转子初始角速度； $\Delta\omega_r$ 为转子转速增量； ω_e 为电网初始角频率； $\Delta\omega_e$ 为电网角频率增量。

分析图 2-4 可知，输送到功率外环的功率参考值由最大功率参考值增量和惯量控制功率增量两部分组成，则可以得到有功功率参考值增量为：

$$\Delta P_{ref} = 3\omega_{r0}^2\Delta\omega_r - \left(\frac{K_d s}{1+T_f s} + K_p \right) \Delta\omega_e \quad (2-6)$$

式中， K_d 为虚拟惯量控制的微分控制系数； K_p 为虚拟惯量控制的比例控制系数； T_f 为低通滤波器时间常数。

考虑到电流内环控制响应时间远小于惯量响应时间，因此机侧变流器电流内环控制模型可以等效为一节惯性环节，则电磁功率增量为：

$$\Delta P_e = \frac{3\omega_{r0}^2\Delta\omega_r - \left(\frac{K_d s}{1+T_f s} + K_p \right) \Delta\omega_e}{1+\tau s} \quad (2-7)$$

式中， τ 为变流器响应时间常数。

当风速大于额定风速时，风电机组通过改变桨距角实现频率调整，这里只讨论风速小于额定风速的情况。由文献[72]可知，机械功率增量可表示为：

$$\Delta P_m = \frac{\partial C_p}{\partial \omega_r} \Delta\omega_r = C_w \Delta\omega_r \quad (2-8)$$

式中， C_w 为机械功率增量系数。

风机转子运动方程可表示为：

$$2H_w s\omega_{r0}\Delta\omega_r = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2-9)$$

将式 (2-7) 和式 (2-8) 代入式 (2-9) 转子运动方程中，因为滤波器时间常数 T_f 一般取 0.1，电流控制环节时间常数 τ 一般取 0.02，所以在表达式中忽略这两部分，推导得到如下式子：

$$\frac{\Delta\omega_r}{\Delta\omega_e} = \frac{K_d s + K_p}{2H_w\omega_{r0}s + 3C\omega_{r0}^2} \quad (2-10)$$

将式 (2-10) 代入式 (2-5) 中，得到风机等效惯量，即风机虚拟惯量时间常数为：

$$H_{wind} = \frac{\omega_{r0}\omega_e H_w}{\omega_{nom}^2} \frac{K_d s + K_p}{2H_w\omega_{r0}s + 3C\omega_{r0}^2} \quad (2-11)$$

由式 (2-11) 可知，风机等效惯量表达式由复频域转为时域时，其值会随着

时间变化，因此不能直接在复频域中分析风机等效惯量的大小，需在时域中寻找到一种计算方法，来分析其等效惯量大小。

2.4 本章小结

本章首先从直驱风机的典型控制出发，介绍了直驱风机跟网型虚拟惯量控制和构网型虚拟惯量控制；进而，明确了直驱风机等效惯量的定义，并以直驱风机跟网型虚拟惯量控制为例推导了其等效惯量的计算方法。

（1）直驱风机跟网型虚拟惯量控制仍采用锁相环 PLL 来给 PWM 调制环节提供相位角，通过在机侧换流器 MPPT 控制环节引入附加功率提供惯量能量，风机本质是电流源；直驱风机构网型虚拟惯量控制则利用直流电容电压作为中间量，把系统频率跟风机耦合起来，风机本质上可以看作是电压源。

（2）当系统中加入带有虚拟惯量控制的风机时，系统的惯量来源被拓展了，因此需要重新定义整个系统的惯量，在惯量响应阶段内能提供惯量支撑的所有能量都要包含进来。同时，以跟网型直驱风机虚拟惯量控制为例，并基于直驱风机跟网型虚拟惯量控制模型提出了风机等效惯量计算方法。

综上所述，本章为后续研究不同控制下风机惯量特性分析奠定了理论基础。

第3章 不同控制下风机的惯量特性分析

3.1 引言

由第 2 章分析可知,直驱风机可采用跟网型虚拟惯量控制或者构网型虚拟惯量控制,作为风机系统惯量的来源。相较于同步发电机,风机虚拟惯量受到风速变化、控制参数、风轮质量等约束,较难达到同步机的惯量水平,但随着风电渗透率的不断攀升,风机惯量越来越体现出其重要性。为了分析不同控制下风机的惯量特性,本章提出一种基于平均功率的风机虚拟惯量评估方法。本章从能量角度分析了约束风机虚拟惯量的因素,进一步基于约束条件估算了两种虚拟惯量控制方式下的惯量支撑平均功率,得出了惯量支撑平均功率对应的控制参数取值,并基于风机小信号模型分析两种风机虚拟惯量控制下随着风电渗透率变化系统的频率响应特性,最后搭建仿真模型验证了惯量特性分析的正确性。

3.2 能量角度评估惯量特性

3.2.1 风机惯量支撑功率约束

同步发电机在惯量响应期间,惯量响应能量来源于转子动能。同理,直驱风机的惯量能量来源受到主轴动能、直流环节电容电场能、降载能量等约束。为了进行后续的分析,有必要对直驱风机在惯量响应阶段的能量来源约束和稳定性约束进行分析。

3.2.1.1 稳定性约束

直驱风机惯量控制类型有跟网型控制和构网型控制,其惯量控制参数取值大小会对整个系统稳定运行造成影响,此外过高的风电渗透率也会对系统稳定性造成影响。因此需要计算出整个系统在不同风机控制下的传递函数,利用传递函数的特征根分布情况分析系统是否稳定。

特征根的分布可以反映稳定性,当所有特征根均位于坐标系左半平面,表明当前系统是稳定的,且特征根离虚轴越近表示稳定性趋于不稳定。为了保证整个系统的稳定,虚拟惯量控制参数和风电渗透率高低的取值应使得系统传递函数特征根的实部全部为负值^[73]。

(1) 直驱风机无虚拟惯量控制

风机无虚拟惯量控制,即惯量响应期间仅由同步机提供功率支撑,那么系统频率响应模型可以表示为^[74]:

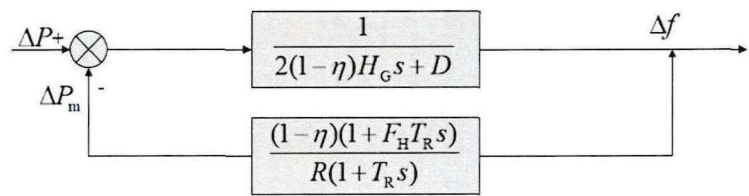


图 3-1 同步机 SFR 模型

计算得到系统的频率响应传递函数为：

$$\Delta f = \frac{1}{1 + \frac{2(1-\eta)H_G s + D}{(1-\eta)(1+F_H T_R s)} R(1+T_R s)} \Delta P \tag{3-1}$$

式（3-1）中同步机控制参数为固定值，将风电渗透率 η ($\eta=0、0.4、0.6、0.8$) 作为变化量，得到该传递函数的特征根分布图。

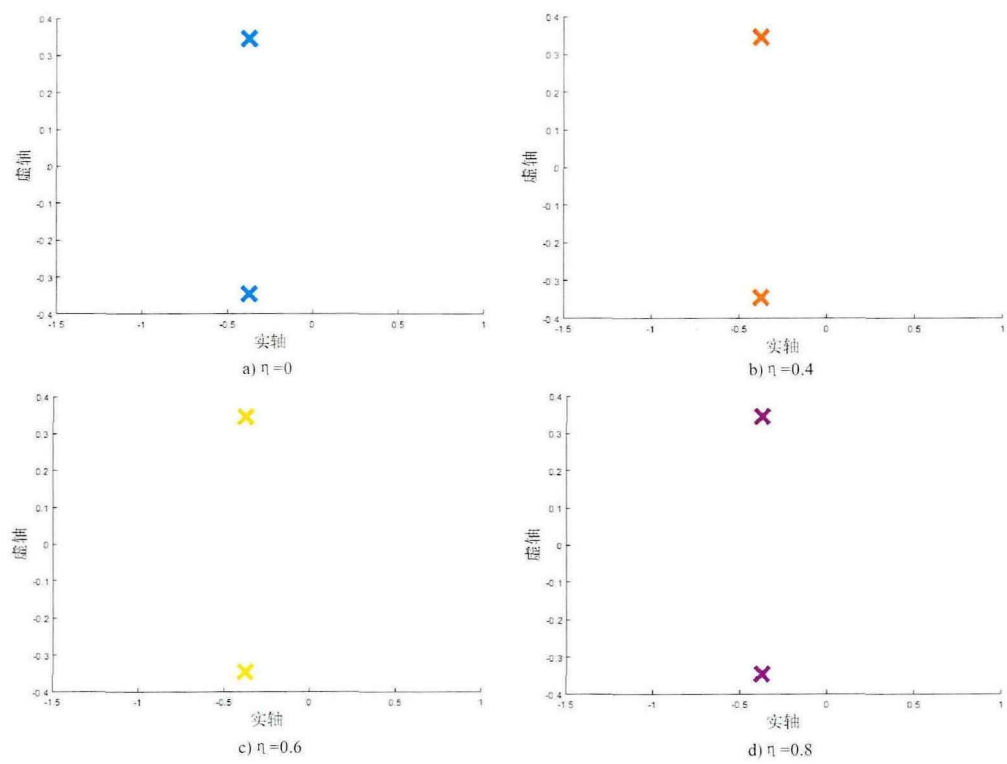


图 3-2 同步机传递函数特征根分布

由图 3-2 可以看出，随着风电渗透率变化，系统特征根恒固定于虚轴左侧，即系统是稳定的。

(2) 直驱风机跟网型虚拟惯量控制

用同等容量的跟网型虚拟惯量控制的风机替换无虚拟惯量控制的风机。

将式（2-7）电磁功率表达式和式（2-9）系统和风机转子角频率增量比代入

式 (2-9) 转子运动方程中, 可以得到系统频率和电磁功率增量之间的关系为:

$$\Delta P_c = \left[\frac{3C\omega_{ro}^2(K_d s + K_p)}{2H_w \omega_{ro} s + 3C\omega_{ro}^2} - (K_d s + K_p) \right] \Delta f \quad (3-2)$$

经整理, 可以得到:

$$G(s) = -\frac{2H_w \omega_{ro} s + 3C\omega_{ro}^2}{2H_w \omega_{ro} s (K_d s + K_p)} \quad (3-3)$$

则系统随着风电渗透率 η 变化的风机采用跟网型虚拟惯量控制时系统的频率响应模型 SFR 模型为:

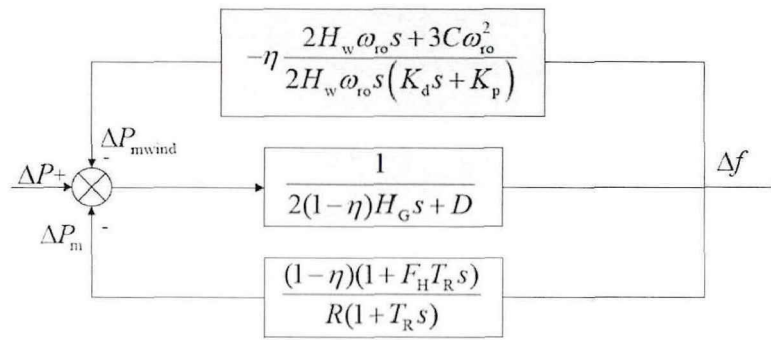


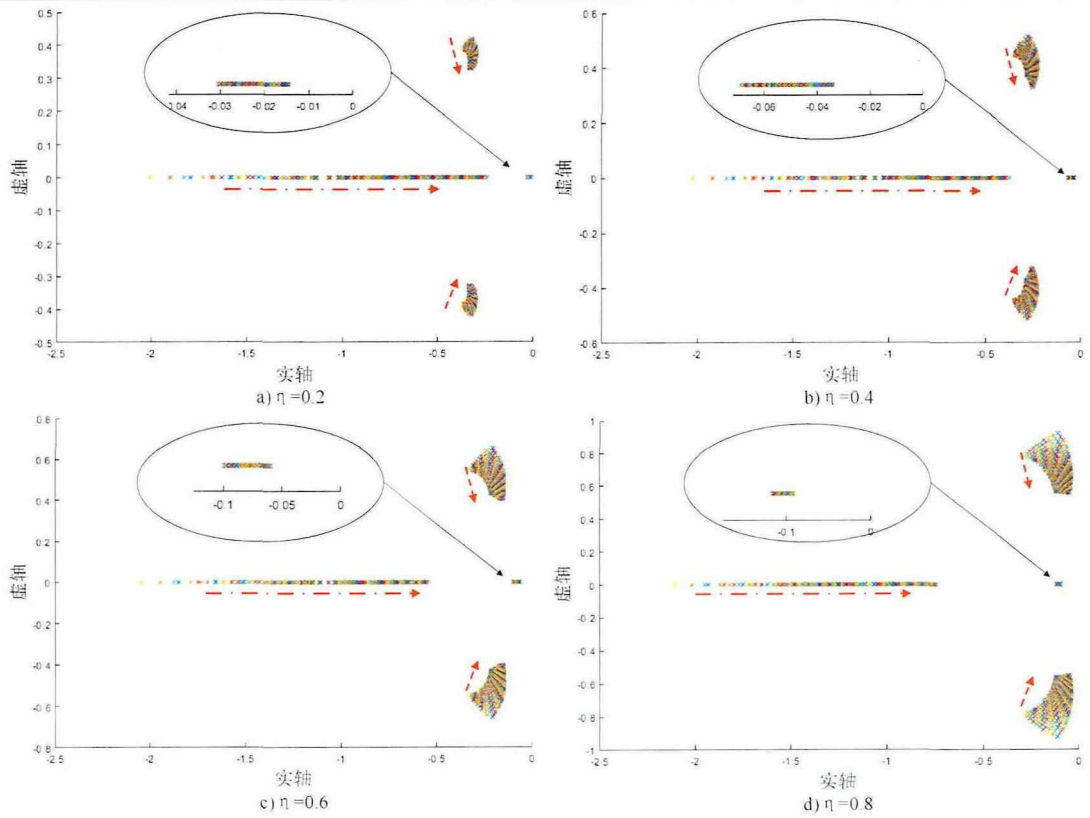
图 3-3 含跟网型风机虚拟惯量控制的系统 SFR 模型

由图 3-3 分析可知, 小信号模型下系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{2(1-\eta)H_G s} \frac{1}{1 + \frac{1}{2(1-\eta)H_G s} \left[\frac{(1-\eta)(1 + F_H T_R s)}{R(1 + T_R s)} - \frac{\eta(2H_w \omega_{ro} s + 3C\omega_{ro}^2)}{2H_w \omega_{ro} s (K_d s + K_p)} \right]} \quad (3-4)$$

将虚拟惯量控制参数 K_d 和 K_p 作为变量, 随着风电渗透率 η 的变化, 计算系统传递函数的特征值, 可以得到其分布图。

分析图 3-4 可知, 随着控制参数增大, 特征根趋于虚轴, 且随着风电渗透率 η 增大, 特征根分布更接近虚轴, 越趋于不稳定。随着控制参数和风电渗透率的增大, 特征根趋于不稳定, 但总是分布于虚轴左侧, 因此系统是稳定的。


 图 3-4 跟网型虚拟惯量控制时随着风电渗透率 η 变化系统特征根分布

(3) 直驱风机构网型虚拟惯量控制

用同等容量的构网型虚拟惯量控制的直驱风机替换无虚拟惯量控制的直驱风机。由图 2-6 可知，输送到功率控制器的功率参考值由最大功率参考值增量和式 (3-5) 惯量传递控制环的功率增量两部分组成。

$$\Delta P_{\text{vic}} = -\frac{K_c s \Delta U_{\text{dc}}}{Ts + 1} \quad (3-5)$$

由图 2-5 可知，风机直流电容电压等同于系统频率，则可用频率替换直流电压。由图 2-6 可以得到有功功率参考值增量为：

$$\Delta P_{\text{ref}} = (3C\omega_{r0}^2 - K_c s f_n) \quad (3-6)$$

考虑到电磁功率反馈，有功功率参考值经过换流器双环结构后可以得到电磁功率增量表达式为：

$$\Delta P_c = \frac{\left(\frac{K_{is}}{s} + K_{ps} \right) \frac{1}{\tau s + 1}}{1 + \left(\frac{K_{is}}{s} + K_{ps} \right) \frac{1}{\tau s + 1}} (\Delta P_{\text{MPPT}} + \Delta P_{\text{vic}}) \quad (3-7)$$

将式 (3-7) 和式 (2-8) 代入式 (2-9)，因为电流控制环节时间常数 τ 一般取 0.02，所以在表达式忽略这两部分，可以得到：

$$\frac{\Delta\omega_t}{\Delta\omega_e} = \frac{\left(\frac{K_{is}}{s} + K_{ps}\right)(K_C s f_n)}{(2H_w \omega_{r0} s + 3C \omega_{r0}^2) \left(1 + \frac{K_{is}}{s} + K_{ps}\right)} \quad (3-8)$$

将式 (3-8) 系统和风机转子角频率增量比代入式 (3-7) 电磁功率表达式中, 可以得到系统频率和电磁功率增量之间的关系:

$$\Delta P_e \approx \frac{\left(\frac{K_{is}}{s} + K_{ps}\right)}{1 + \frac{K_{is}}{s} + K_{ps}} (-K_C s f_n) \Delta f \quad (3-9)$$

经整理, 可以得到:

$$G(s) = -\frac{1 + \frac{K_{is}}{s} + K_{ps}}{K_C s f_n \left(\frac{K_{is}}{s} + K_{ps}\right)} \quad (3-10)$$

则系统随着风电渗透率 η 变化的风机采用构网型虚拟惯量控制时系统的频率响应模型 SFR 模型为:

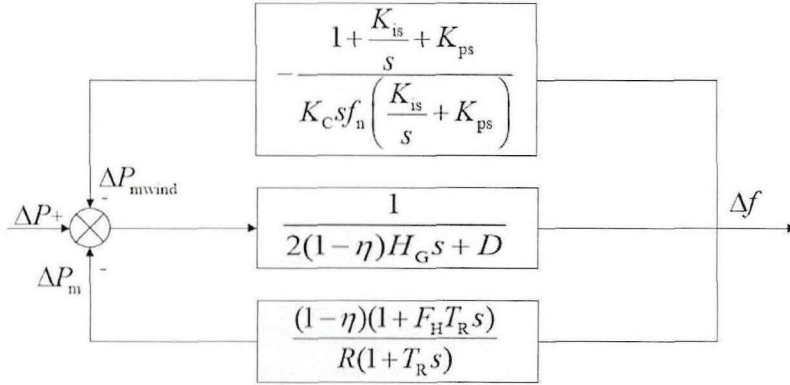


图 3-5 含构网型风机虚拟惯量控制的系统 SFR 模型

由图 3-5 可得, 扰动功率和系统频率之间的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{2(1-\eta)H_G s} \left[1 + \frac{1}{2(1-\eta)H_G s} \left\{ \frac{(1-\eta)(1 + F_h T_R s)}{R(1 + T_R s)} + \frac{\eta \left(1 + \frac{K_{is}}{s} + K_{ps}\right)}{(K_C s f_n) \left(\frac{K_{is}}{s} + K_{ps}\right)} \right\} \right] \quad (3-11)$$

将虚拟惯量控制参数 K_{is} 和 K_{ps} 作为变量, 随着风电渗透率 η 的变化, 计算系统传递函数的特征值, 可以得到其分布图。

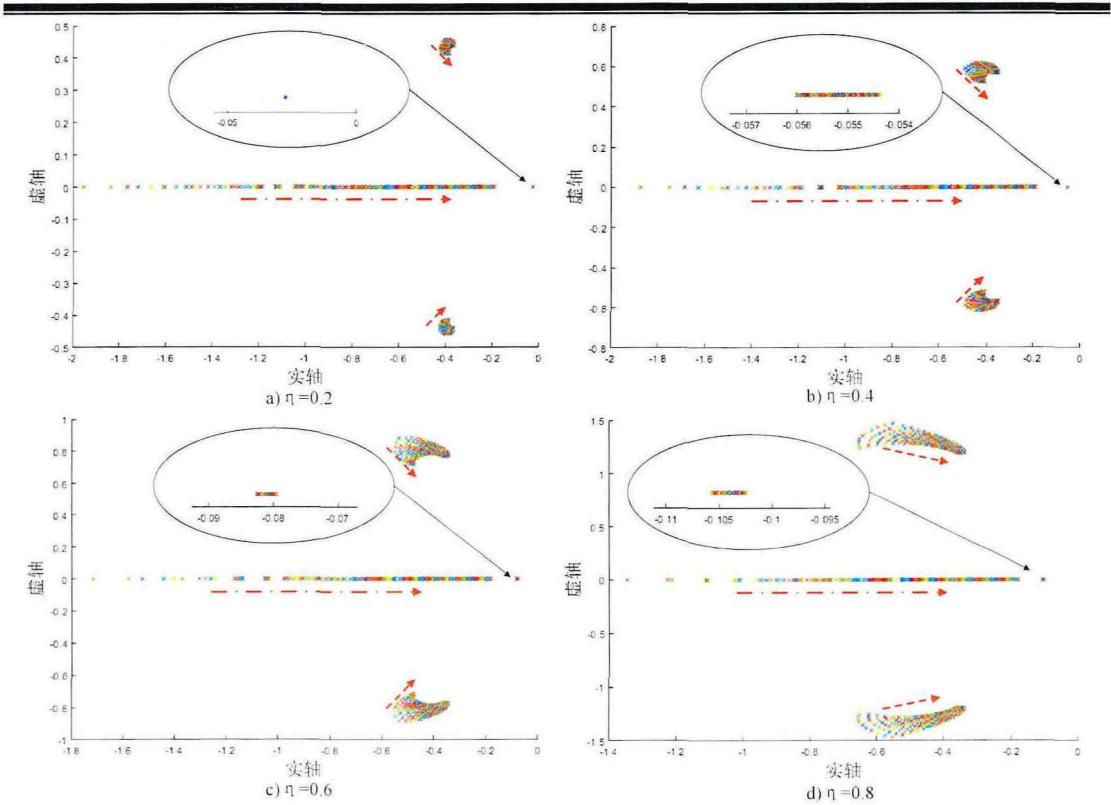


图 3-6 构网型虚拟惯量控制时随着风电渗透率 η 变化系统特征根分布

分析图 3-6 可以得到，对比跟网型虚拟惯量控制，随着控制参数增大，特征根变化趋势较为明显；随着风电渗透率 η 增大，特征根分布更接近虚轴，但变化趋势相较于跟网型虚拟惯量控制不明显。随着控制参数和风电渗透率的增大，特征根趋于不稳定，但总是分布于虚轴左侧，因此系统亦是稳定的。

3.2.1.2 转子动能约束

直驱风机虚拟惯量能量来源于风机叶轮、转子和直流电容，因风机叶轮和转子通过机械部件连接，所以后续风机叶轮和转子转动能量统称为转子动能。若忽略直流电容提供的能量，两种惯量控制能量来源于转子动能，因此惯量支撑提供的能量小于等于惯量响应期间叶轮和转子动能损失，即

$$W_H \leq E_{\Sigma} \tag{3-12}$$

转子动能可以表示为：

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} J (2\pi \frac{n}{60N})^2 \tag{3-13}$$

其中， ω 为转子角速度； n 为转子转速； J 为风机转动惯量； N 为齿轮箱变比。

惯量支撑所需能量可以表示为：

$$W \approx \int_0^T 2H \frac{df}{dt} \frac{S_N}{f_N} dt \tag{3-14}$$

3.2.2 惯量支撑平均功率估算

风机等效虚拟惯量时间常数 H_{eq} 是从能量角度评估惯量水平的重要物理量，考虑到其是一个随着转子角速度增量和同步角速度增量变化而变化的时变量，而传统同步机惯量时间常数是一个定值，无法直接利用惯量时间常数去比较同步机、跟网型虚拟惯量控制风机和构网型虚拟惯量控制风机的惯量水平。再加上同步机、跟网型虚拟惯量控制风机和构网型虚拟惯量控制风机的控制结构差异巨大，所以本文从能量角度出发，以惯量响应时间内提供的平均有功功率为评价标准评估三种设备的惯量水平，并为下一步分析惯量动态特性寻找相同惯量支撑能力的控制参数范围。

假设同步机容量取 50MVA，数量为 2 台；跟网直驱风机、构网直驱风机容量各取 2MVA，数量为 50 台。

等值发电机的转子运动方程可以表示为：

$$2H \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (3-15)$$

惯量支撑功率约为：

$$P_H(t) \approx -2H \frac{df}{dt} \frac{S_H}{f_n} \quad (3-16)$$

惯量支撑平均功率计算表达式为：

$$\bar{P} \approx \frac{1}{T} \int_0^T 2H \frac{df}{dt} \frac{S_N}{f_N} dt \quad (3-17)$$

(1) 同步机平均功率估算

同步发电机的惯量时间常数由同步机转动部分的质量决定，因此同步机惯量时间常数跟时间无关。根据式 (3-15) ~ (3-17)，可以得到同步机发电机的平均功率为：

$$\bar{P}_G = \frac{1}{T_G} \int_0^{T_G} 2H \frac{df}{dt} \frac{S_H}{f_n} dt \quad (3-18)$$

其中， T_G 为同步机惯量响应时间， H 为同步机惯量时间常数， S_H 为额定容量， f_n 为额定频率，计算可得到同步机平均惯量支撑功率。

(2) 跟网型直驱风机平均功率估算

将式 (2-10) 代入式 (2-5) 中，得到风机虚拟惯量常数为：

$$H_{eq1} = \frac{\omega_{r0} \omega_e H_w}{\omega_{nom}^2} \frac{K_d s + K_p}{2H_w \omega_{r0} s + 3C \omega_{r0}^2} \quad (3-19)$$

对上式进行拉式反变换，代入式 (3-17) 中，并将 K_d 和 K_p 作为变量，可以得到下图：

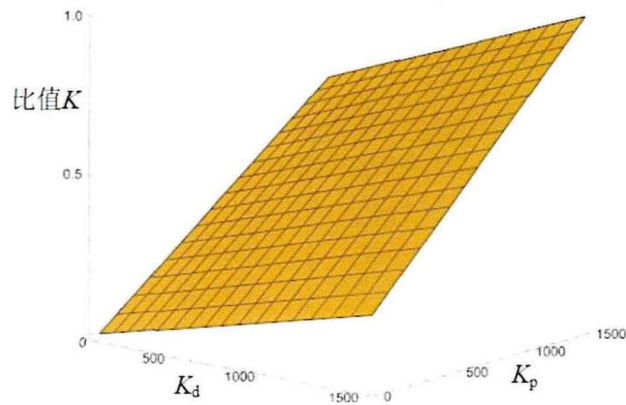


图 3-7 跟网型直驱风机平均功率估算

其中风机固有惯量 H_w 取 4 秒，风机转子初始角速度 ω_{r0} 取 18.9 rad/s，系统初始角速度取 314 rad/s，风机额定角速度 ω_{nom} 取 18.9 rad/s，频率微分系数 K_d 和频率比例系数 K_p 作为变量。为方便与同步机惯量支撑能力对比，最后结果为风机惯量支撑平均功率和同步机惯量支撑平均功率的比值。

由图 3-7 可知，跟网型风机与同步机平均惯量支撑功率比值随着频率微分系数 K_d 和频率比例系数 K_p 的增大而增大，且 K_p 对比率的影响较大。因同步机平均功率是一个定值，所以风机平均功率支撑功率随着两个变量的增大而增大。

(3) 构网型直驱风机平均功率估算

将式 (3-8) 代入式 (2-5) 中，得到风机虚拟惯量常数为：

$$H_{eq2} = \frac{\omega_{r0} \omega_e H_w}{\omega_{nom}^2} \frac{\left(\frac{K_{is}}{s} + K_{ps} \right) (K_c s f_n)}{(2H_w \omega_{r0} s + 3C \omega_{r0}^2) \left(1 + \frac{K_{is}}{s} + K_{ps} \right)} \quad (3-20)$$

对上式进行拉式反变换，代入式 (3-17) 中，并将 K_{ps} 和 K_{is} 作为变量，可以得到下图：

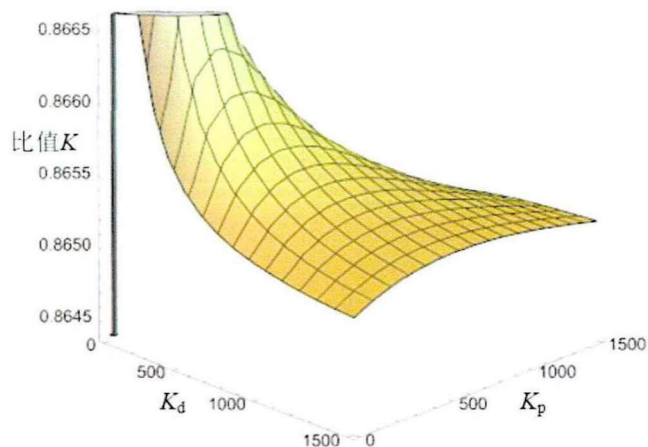


图 3-8 构网型直驱风机平均功率估算

其中，风机固有惯量 H_w 取 4 秒，风机转子初始角速度 ω_{r0} 取 19.8 rad/s，系统初始角速度取 314 rad/s，风机额定角速度 ω_{nom} 取 19.8 rad/s，调节系数 K_c 取 0.35，比例系数 K_{ps} 和积分系数 K_{is} 为变量。同样，最后结果为风机惯量支撑平均功率和同步机惯量支撑平均功率的比值。

首先分析直流电容提供的惯量支撑功率。直流电容惯性时间常数 H_c 的表达式为：

$$H_c = \frac{CU_{dcn}^2}{2S_n} \quad (3-21)$$

将式 (3-20) 代入式 (3-17) 中。在此种控制方式下，直流电压标么值跟随系统频率标么值，在系统频率变化 0.2Hz 的情况下，提供的平均惯量支撑功率约为同步机的 3% 左右，即惯量支撑能力很小。因此后续分析中可忽略直流电容对惯量支撑能力的影响，可认为只起到传递系统频率的作用。

由图 3-8 可知，构网虚拟惯量控制风机与同步机平均惯量支撑功率比值 K 随着功率控制器比例系数 K_{is} 的增大而减小，随着功率控制器比例系数 K_{ps} 的增大而减小。不同于跟网型风机，构网型风机若参数设置合理，可以达到较高的惯量支撑效果。此外，直流电容若不附加额外的措施（超级电容、飞轮等），则其对整个系统的惯量支撑能力很小，为方便后续分析，可以近似忽略。

(4) 惯量支撑能力对应的参数取值

目前，风机并网的主流控制方式为电流源型跟网控制，其旨在对输出电流进行控制，以精确调节所需并网功率，即作为注入功率的电流源。相比之下，构网型风机可以自主决定频率，不需要额外的锁相环，即作为电压源。两种控制结构差异很大，不能直接通过惯量常数来分析。因此，从能量角度出发，找到两组惯量支撑能量对应的参数值，进行下一步分析。

对于两种控制方式下的直驱风机，忽略直流环节的电容能量，在惯量响应期间的能量本质上来源于转子的旋转动能，因此取值之前需要考虑转子动能约束条件。

将跟网型虚拟惯量控制风机和构网型虚拟惯量控制风机相关参数代入式 (3-13) 和式 (3-14) 中，并设风机惯量响应期间最小转速为 1200 r/min，额定转速为 1500 r/min，取等效转动惯量 J 为 $8 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 风机转动惯量。

跟网型控制风机功率在转子动能约束下的图为：

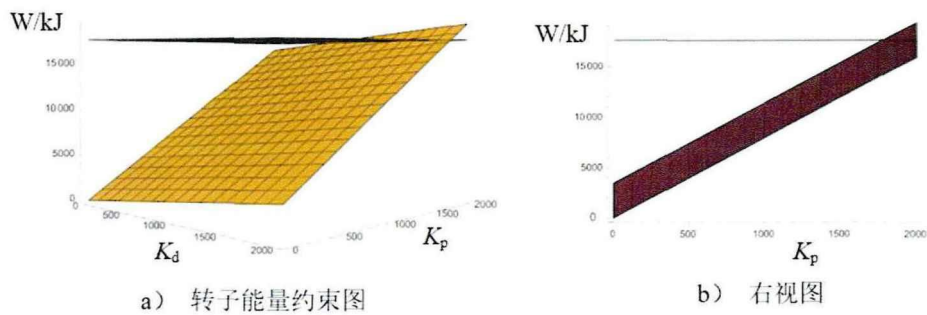


图 3-9 跟网型控制转子能量约束

如图 3-9，可以看出，在所给参数范围内，部分参数所计算出的平均功率超出了转子动能约束，因此在后续分析把这部分参数去除。

构网型控制风机功率在转子动能约束下的图为：

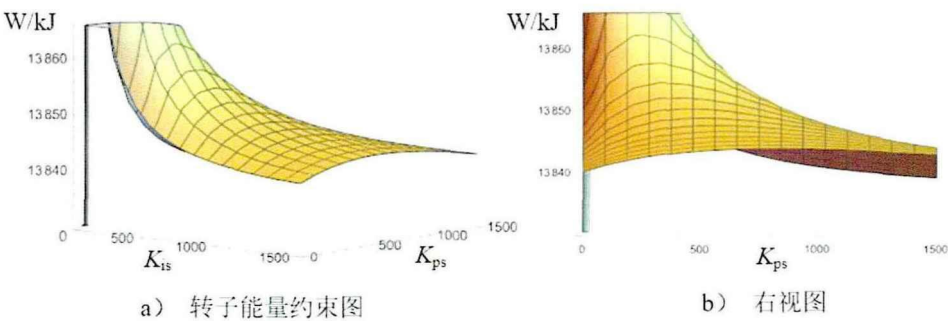


图 3-10 构网型控制转子能量约束

如图 3-10 可知，在所给参数内平均功率均未超过转子动能约束。

前边两个小节各自分析了风机跟网型和构网型虚拟惯量控制与同步机的惯量支撑能力差异，但两种控制下风机频率动态特性不能直接比较。因此，需要确定跟网型虚拟惯量控制和构网型虚拟惯量控制下风机平均惯量支撑功率相同时，两种控制参数的取值范围。

结合图 3-7 和图 3-8 可以得到图 3-11，两图的交叉处既是平均惯量支撑功率相同的参数取值。

由图 3-11 可以看出，曲线交叉处可以取得惯量支撑能力相同的一组控制参数，同时在跟网型虚拟惯量控制风机功率评估图上取另一组控制参数，与前一组形成对比。参数取值均在系统稳定性和转子动能约束取值范围内。

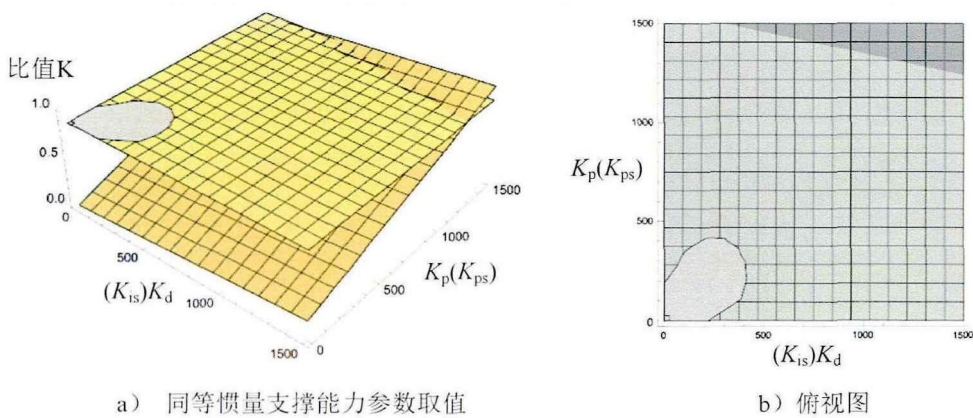


图 3-11 平均惯量支撑功率相同的参数

3.2.3 不同控制下系统频率响应特性

以上分析，已经确定了风机和同步机的控制参数，在此基础上，分析不同风机控制、不同风电渗透率情况下系统频率的动态特性。假设有 4 台 50MVA 的同步机，随着风电渗透率的增加，同步机占比下降，空缺的容量由风机补充。

(1) 风机无虚拟惯量控制

根据式 (3-1)，随着风电渗透率增加，系统频率响应特性曲线为：

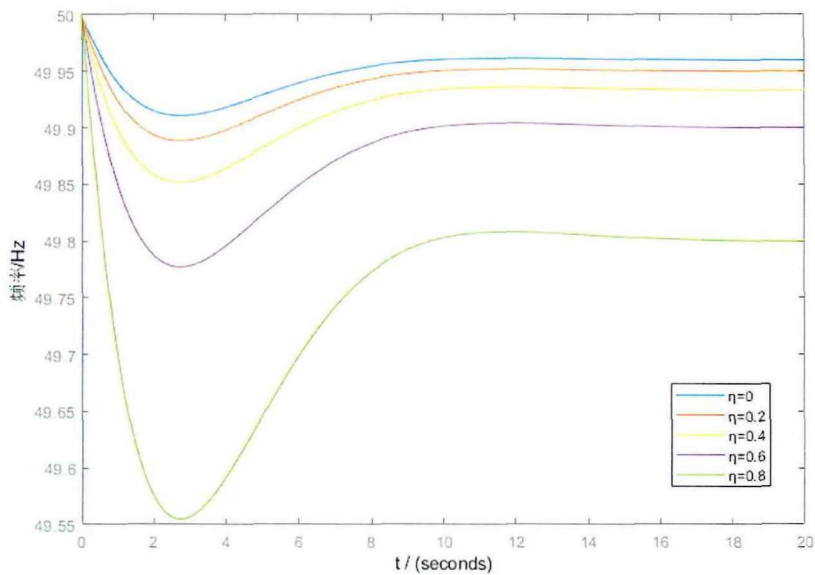


图 3-12 风机无虚拟惯量控制系统频率响应特性

根据图 3-12 分析，风机无附加惯量控制情况下，由于背靠背换流站的隔离作用，风机与系统频率无耦合，系统惯量仅取决于同步机惯量的多寡。

惯量响应期间，随着风电渗透率的增加，系统中同步发电机提供的惯量减小，系统频率偏差不断增大，频率变化率不断增大。风机功率只起到功率注入的作用，不参与系统惯量响应。

(2) 风机跟网型虚拟惯量控制

根据式 (3-4)，随着风电渗透率增加，系统频率响应特性曲线为：

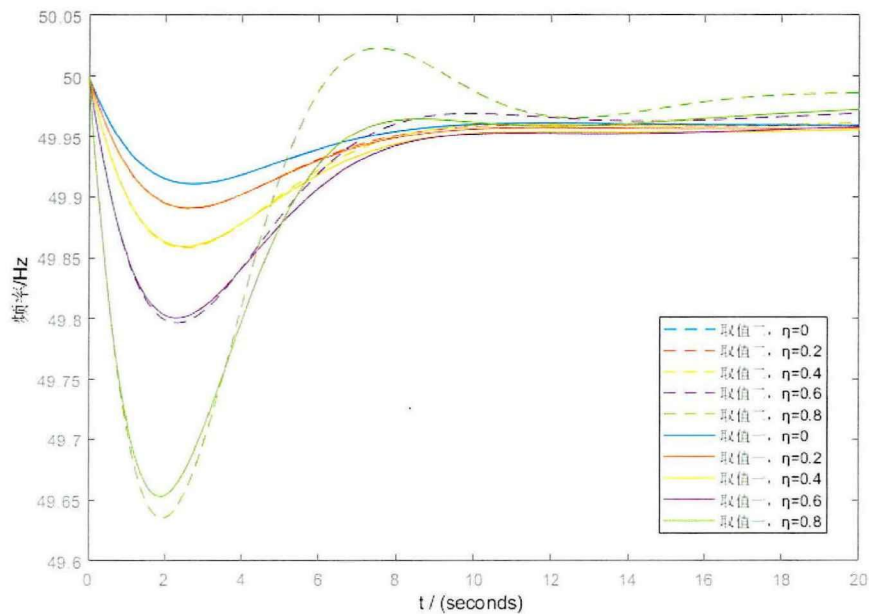


图 3-13 风机跟网型虚拟惯量控制系统频率响应特性

根据图 3-13 分析，风机附加跟网型惯量控制情况下，风机呈现出有功功率源功率注入特性。通过锁相环 PLL，风机频率与系统频率存在耦合，系统惯量由同步机和风机共同影响。

惯量响应期间，随着风电渗透率的增加，系统中同步发电机提供的惯量减小，风机提供的虚拟惯量增大，整体上系统频率偏差不断增大，频率变化率不断增大。风机功率起到功率注入的作用，同时参与系统惯量响应。同时分析发现，平均功率高的一组参数对应的系统频率特性更好。

(3) 风机构网型虚拟惯量控制

根据式 (3-11)，随着风电渗透率增加，系统频率响应特性曲线为：

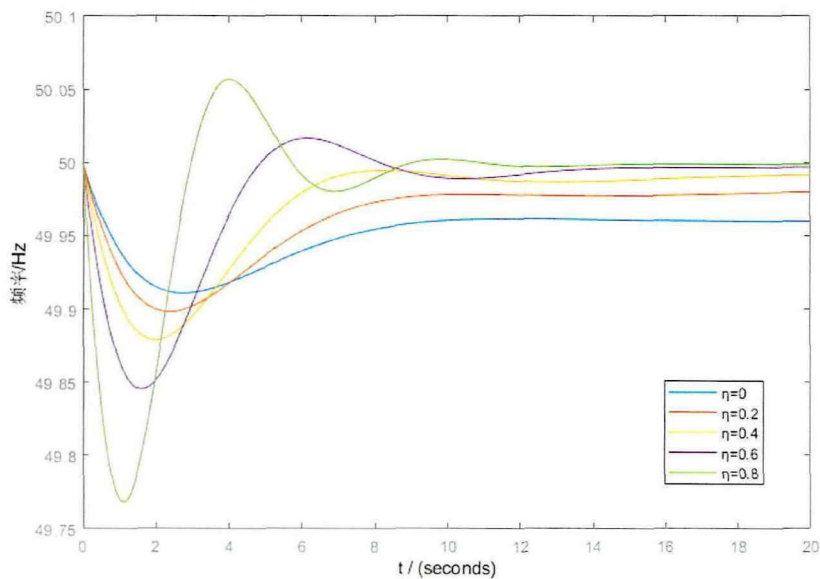


图 3-14 风机构网型虚拟惯量控制系统频率响应特性

根据图 3-14 分析，风机附加构网型惯量控制情况下，风机呈现出受控电压源特性。通过惯量控制环节，风机频率与系统频率直接耦合，系统惯量由同步机和风机共同影响。同跟网型虚拟惯量控制，构网型虚拟惯量控制下系统频率偏差不断增大，频率变化率不断增大。

综上，惯量响应期间，随着风电渗透率的增加，系统中同步发电机提供的惯量减小，风机提供的虚拟惯量增大，较高惯量平均功率对应的虚拟惯量控制方式惯量响应效果更好，同时风电渗透率较高时，构网型虚拟惯量控制风机惯量支撑效果表现更好。

3.3 仿真分析

在 PSCAD 中建立如图 3-15 所示的仿真模型，风机和交流侧同步机采用 CIGRE 标准算例模型。同步机额定容量设置为 50 MVA，风机额定容量为 2 MVA，负荷： $P_{L1}=200\text{ MW}$ ， $Q_{L1}=0\text{ MVar}$ ， $P_{L2}=10\text{ MW}$ ， $Q_{L2}=0\text{ MVar}$ 。通过仿真试验对比分析不同控制下风机惯量特性。

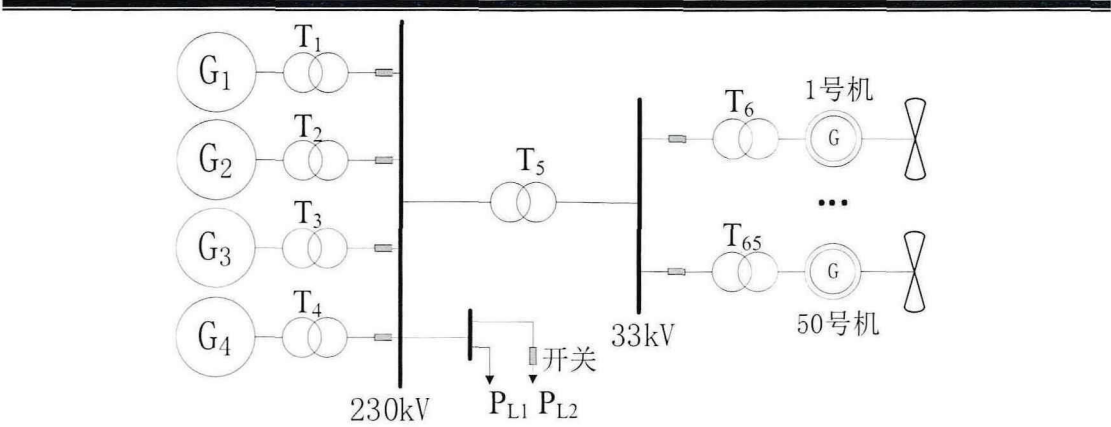


图 3-15 系统仿真模型

系统参数为：永磁直驱风机额定电压为 $V_n=690\text{V}$ ，额定功率 $P_m=2\text{MW}$ ，定子电阻 $R_s=0.0017\text{pu}$ ，定子电感 $L_s=0.0364\text{pu}$ ，转子电阻 $R_r=0.055\text{pu}$ ，转子电感 $L_r=0.62\text{pu}$ ，励磁电感 $L_m=1\text{pu}$ ，固有惯量时间常数 $H_w=4\text{s}$ ，额定角速度 $\omega_n=157.08\text{rad/s}$ ，额定风速 $V_{\text{wind}}=10\text{m/s}$ ，初始桨距角 $\beta_0=0^\circ$ ，同步发电机惯性时间常数 $H_J=6\text{s}$ ， $X_d=1.014\text{pu}$ ， $X'_d=0.314\text{pu}$ ， $X_q=0.77\text{pu}$ ， $X'_q=0.428$ ， $X''_q=0.375$ ， $T_{d0}=6.55\text{s}$ ， $T'_{d0}=0.039\text{s}$ ， $T_{q0}=0.95\text{s}$ ， $T'_{q0}=0.51\text{s}$ ， $R_s=0.002\text{pu}$ ， $H_J=6\text{s}$ 。变压器非标准变比为 1.0， $R_t+jX_t=0+j0.15\text{pu}$ ；传输线路 $R_L=0.0001\text{pu/km}$ ， $X_L=0.001\text{pu/km}$ ， $B_c=0.00175\text{pu/km}$ 。

3.3.1 风电渗透率为 25%时仿真结果

设置四组仿真模型，分别为风机无虚拟惯量控制、风机跟网型虚拟惯量控制方式一、风机跟网型虚拟惯量控制方式二、风机构网型虚拟惯量控制，风电渗透率设为 25%，负荷 P_{L2} 在 20s 时接入系统，可以得到如图 3-16 和图 3-17 仿真结果。

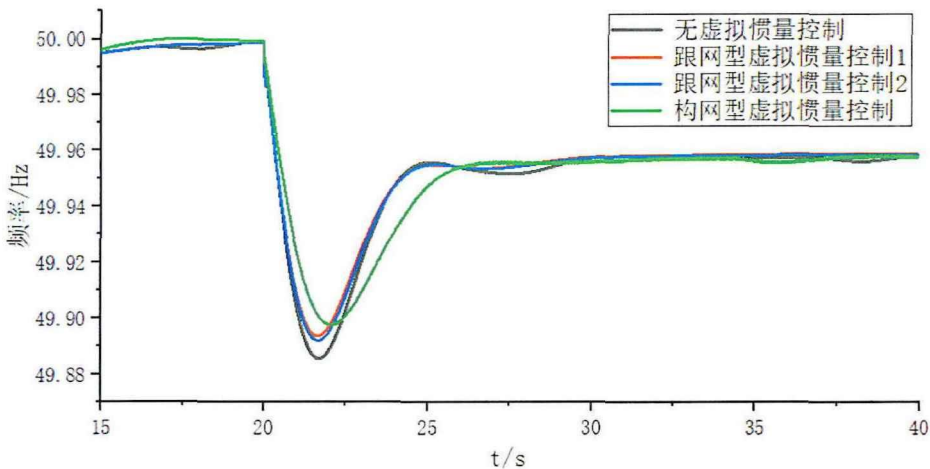


图 3-16 不同控制下系统频率变化情况

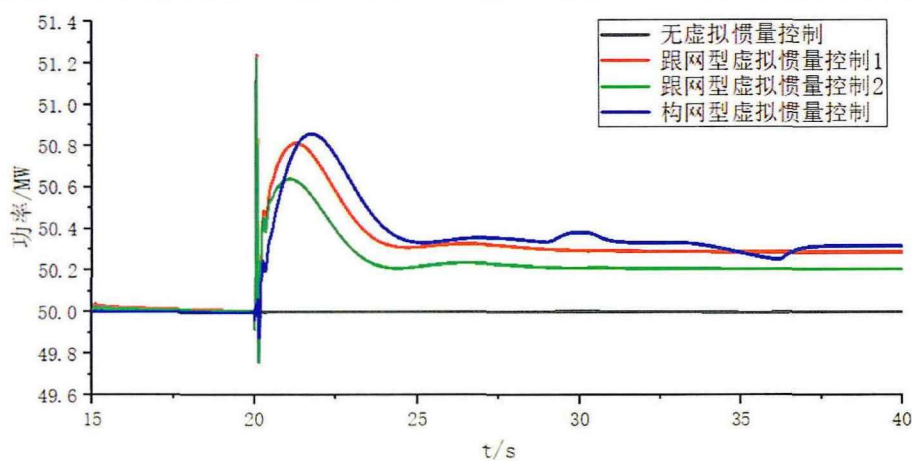


图 3-17 不同控制下风机的出力情况

如图 3-16 和图 3-17，风机无虚拟惯量控制时，系统惯量响应完全由同步机主导，且由于风电的加入系统惯量支撑能力下降，系统频率在扰动发生时下跌较为严重，同时风机稳定保持每台 2MW 的出力，没有额外的功率输出；风机采用跟网型和构网型虚拟惯量控制时，系统频率恶化情况得到延缓，风机增加了额外的出力，减小了系统频率变化率和频率最低点幅值。

3.3.2 风电渗透率为 50%时仿真结果

同 3.3.1 节，设置四组仿真模型，分别为风机无虚拟惯量控制、风机跟网型虚拟惯量控制方式一、风机跟网型虚拟惯量控制方式二、风机构网型虚拟惯量控制，风电渗透率设为 50%，负荷 P_{L2} 在 20s 时接入系统，可以得到如图 3-18 和图 3-19 仿真结果。

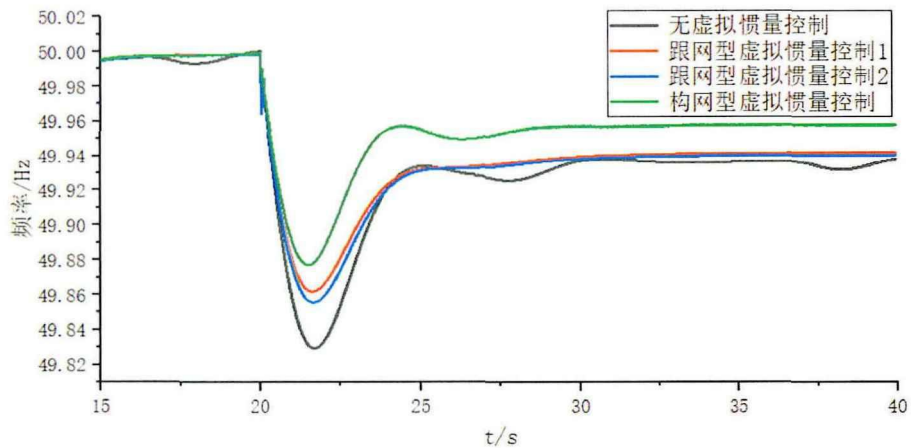


图 3-18 不同控制下系统频率变化情况

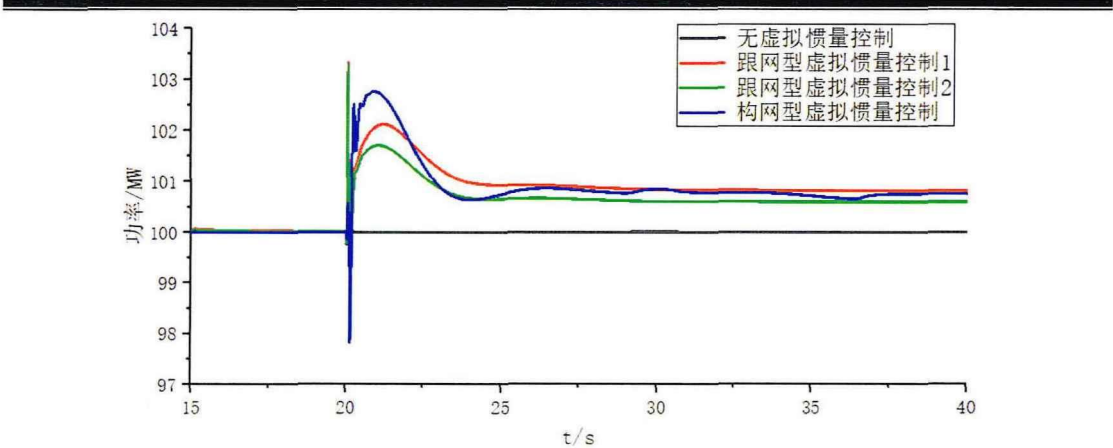


图 3-19 不同控制下风机的出力情况

如图 3-18 和图 3-19，无惯量控制时，随着风电渗透率从 25% 上升到 50% 时，系统频率在发生功率扰动后进一步恶化，但风机采用虚拟惯量控制时仍能提供一定的惯量支撑能力。相比与跟网型虚拟惯量控制方式二，风机采用跟网型虚拟惯量控制方式一时，扰动发生后，系统频率变化率减小，系统频率最低点幅值减小约 0.02Hz，额外用于惯量支撑的最高输出功率增加约 0.4MW，可以发现惯量响应期间惯量支撑平均功率越高，即惯量支撑能量越高，风机的惯量支撑能力越强。在高风电渗透率场景下，构网型虚拟惯量控制释放功率速度更快，有着更优的惯量支撑表现。同时，采用两种虚拟惯量控制方式下，系统频率跌落均未超过 ±0.2Hz，满足系统频率安全要求。

3.4 本章小结

本章基于上一章所分析的两种直驱风机虚拟惯量控制，研究了两种控制下风机的风机惯量特性，分析了随着风电渗透率的变化，风机系统在不同控制下发生功率扰动时对系统的惯量支撑能力，并得出了惯量响应期间惯量支撑平均功率越高，即惯量支撑能量越高，风机的惯量支撑能力越强的结论。为了验证所得结论的正确性，以 CIGRE 标准算例模型为基础，研究了直驱风机系统不同控制下、不同风电渗透率下的惯量支撑效果，结论如下：

（1）系统发生 0.02pu 功率扰动时，无虚拟惯量控制的风机系统能稳定输送功率，跟网型和构网型虚拟惯量控制的风机能额外增加出力来增加系统惯量支撑能力。随着风电渗透率上升，发生扰动时系统频率会恶化，但系统惯量随着风机惯量支撑功率的增加，风机抵御系统频率恶化的能力进一步增强。

（2）相比与跟网型虚拟惯量控制方式二，风机采用跟网型虚拟惯量控制方式一时（即惯量支撑能量越高），扰动发生后，系统频率变化率减小，系统频率最低点幅值减小，额外用于惯量支撑的最高输出功率增加，表明惯量支撑平均功率越高，风机的惯量支撑能力越强。

第4章 直驱风机惯量支撑能力提升策略

4.1 引言

由第 3 章研究可知，不同虚拟惯量控制下惯量响应效果存在差异，理论分析和仿真验证发现惯量支撑平均功率越高，风机的惯量支撑能力越强，如若进一步提升风机系统的惯量响应能力，还需附加额外的惯量能量来源。本章着重分析了蓄电池储能和超级电容对系统惯量提升的影响，在第 3 章的基础上并结合第 2 章不同风机控制的惯量特性，以跟网型直驱风机虚拟惯量控制为例，分析了蓄电池储能和超级电容运行机理，分别提出了蓄电池储能和超级电容惯量响应的控制策略，并基于两者惯量响应特性，提出蓄电池储能-超级电容联合提升系统惯量的策略，并采用 PSCAD 搭建模型验证了本文策略的正确性。

4.2 考虑电池储能的风机惯量提升策略

4.2.1 锂离子电池储能运行机理及其特性

4.2.1.1 运行机理

锂离子电池结构的核心组件包括正极、负极、电解液、隔膜及封装系统。正极材料通常选用锂化合物，其中磷酸铁锂（ LiFePO_4 ）和钴酸锂（ LiCoO_2 ）应用最为广泛；负极则采用石墨材料。电解液由六氟磷酸锂（ LiPF_6 ）溶解于碳酸酯溶剂构成，隔膜为微孔高分子薄膜，具有选择性离子透过性（仅允许 Li^+ 迁移）。

锂离子电池工作原理如图 4-1 所示（以钴酸锂电池体系为例），其充放电过程涉及正负极表面的电化学反应。

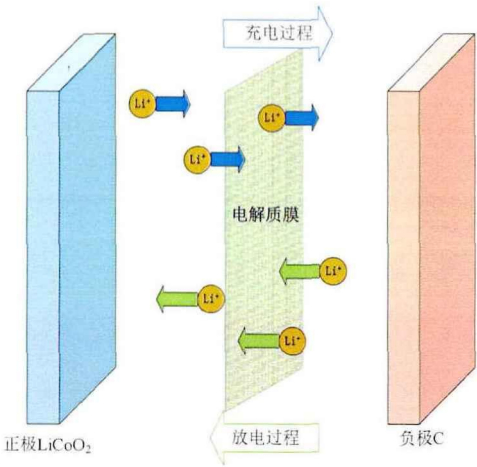


图 4-1 锂离子电池原理

锂离子电池充放电过程可概括为：充电时 Li^+ 从正极 LiCoO_2 脱出，经电解液迁移至负极嵌入形成 LiC 化合物；放电时则逆向脱出并返回正极。该过程通过外

加电场驱动实现锂离子定向迁移，完成电能与化学能的相互转换。

4.2.1.2 特性及参数分析

锂离子电池的性能参数主要包含容量、电池充放电倍率、电池荷电状态（State of Charge, SOC）、工作电压、内阻、温升特性及循环寿命等关键指标。

(1) 电池容量

电池容量指特定条件下可释放的电荷量，是衡量其储能能力的关键指标。容量数值越大，对应储存电量越高，常用安时（Ah）或毫安时（mAh）作为单位，具体分为实际容量、理论容量及额定容量三种类型。实际容量受截止电压控制，即在放电终止时停止的电荷量；额定容量为厂商标称值，基于特定条件测试所得；理论容量则为活性物完全反应的理想极限值。实际容量常因温湿度等因素低于额定值，三者共同构成电池储能特性的量化评价体系。电池容量的计算公式为：

$$Q = \int_{t_n}^{t_1} I dt \tag{4-1}$$

式（4-1）中， Q 为电池容量， I 为充放电电流，通过安时积分法计算容量，即对 $I-t$ 曲线进行积分。

(2) 电池电压特性

电池电压特性包含四类关键参数：开路电压指无负载时两极电势差，工作电压为带载状态下的实测电压，充电截止电压为充能上限，放电截止电压为放能下限。实际使用需严格调控充放电窗口，防止电池损伤及性能衰减。

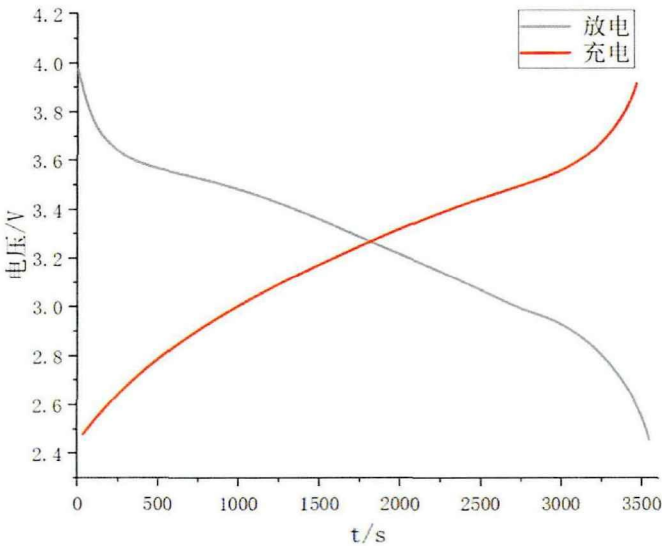


图 4-2 电池充放电过程中电压变化

如图 4-2，电池的充放电过程可以分为三个阶段。在预放电阶段电压迅速下降，随着容量的减小，电压开始缓慢下降，到放电后期电压下降速度又加快。充电过程近似为放电的逆过程。本章可以利用预充电时电池的快速放电以及中段稳

定放电，设计控制策略为风机系统提供惯量响应功率。

(3) 电池充放电倍率

电池充放电倍率表征其充放电速率特性，充放电倍率越大则库伦效率越低，倍率差越大，放电时间差越大，曲线变化越大，且过高的倍率会引发锂离子快速脱嵌，导致电解液浓度梯度异常升高，造成离子传输受阻及界面极化加剧。这不仅降低充放电效率，还会提前触发截止电压，导致容量衰减显著^[75]，因此本章选择充放电倍率为 $4C$ 。

(4) 电池内阻

锂离子电池内阻指电流流经时的内部阻抗，包含欧姆内阻及极化内阻（电化学/浓差）。内阻增大会导致焦耳热累积，加剧内部功耗，缩短循环寿命。

(5) 电池荷电状态

SOC 是电池管理系统的核心参数之一，直接影响电池的充放电控制、寿命预测和安全运行。如图 4-3 可知，电池的充放电过程中，SOC 变化缓慢，波形近似为一次函数曲线。

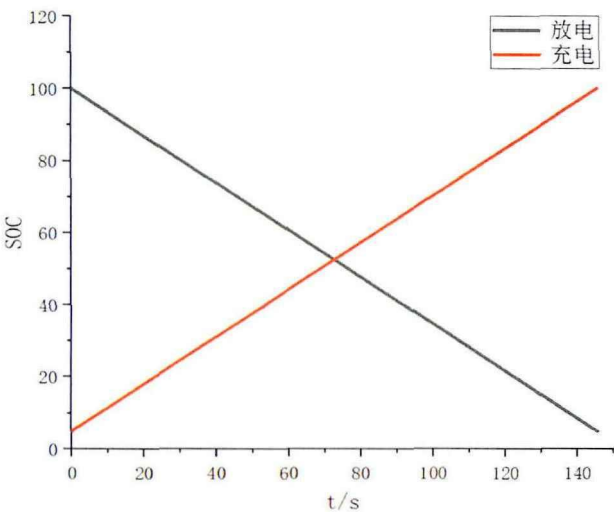


图 4-3 充放电时 SOC 变化

4.2.2 考虑锂离子电池储能的风机直流侧控制

4.2.2.1 锂离子电池建模

锂离子电池建模需考虑电压、电流及 SOC 之间的耦合效应。高精度模型应建立电池性能与参数的映射关系，通过提升模型精度可优化电池输出功率的准确性。因此需选取适配本文研究内容的模型，常用模型包括电化学模型、神经网络模型及等效电路模型。等效电路模型由于模型精确度较高，计算简便，模型复杂度低等优点，目前广泛应用于电池特性研究中。

锂离子电池的等效电路模型可以描述电池的动态特性，目前常见的电池等效

电路模型主要有 Rint 模型、一阶 Thevenin 模型、双极化模型、PNGV 模型、GNL 模型。

本研究采用一阶 Thevenin 模型，如图 4-4，该模型结构简单，考虑了电池的极化现象，缺点是对电池特性描述存在局限，在外界扰动大时会产生比较大的误差。但考虑到其应用场景中，扰动为 0.05pu，扰动较小，因此该模型可用于本研究中。

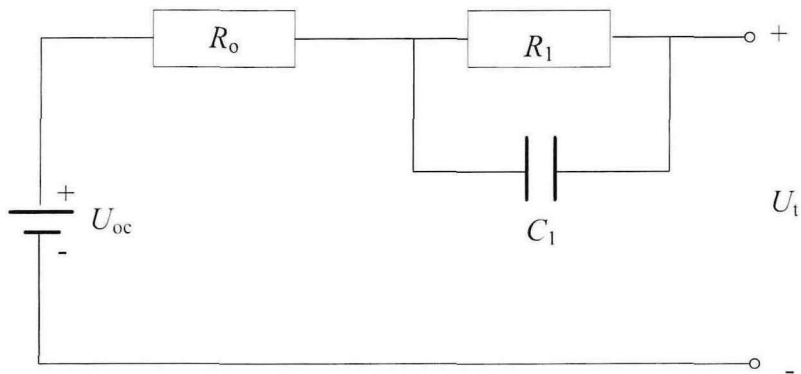


图 4-4 一阶 Thenvenin 模型

4.2.2.2 电池储能控制策略和并网接入方式

如图 4-5，双向 DC/DC 变换器作为储能系统与电网的功率接口，通过开关控制实现能量双向传输。该装置通过降压/升压调节储能单元电压，既可灵活充放电，又能提升储能利用率，有效降低系统投资成本。

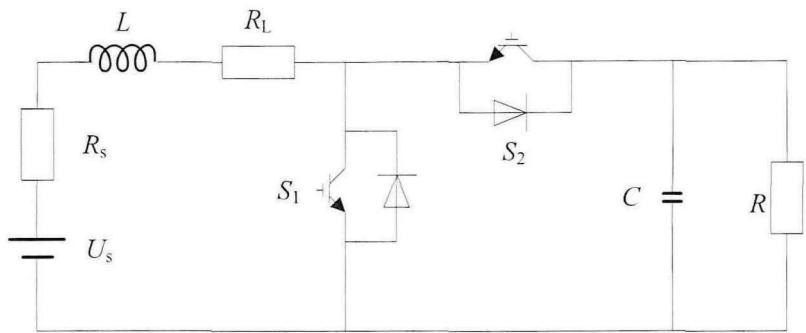


图 4-5 双向 Buck/Boost 变换器

DC/DC 变换器低压侧，可以根据电池的荷电状态和用户需求进行充放电。为了将系统的频率变化实时反馈给电池，让电池依据本身的荷电状态和系统频率变化进行充放电，设计了以下控制策略，如图 4-6。

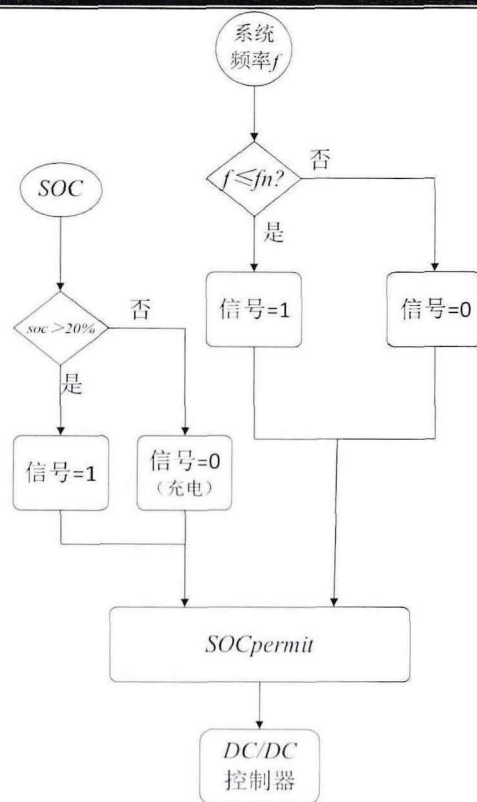


图 4-6 电池控制策略

控制策略逻辑为：将系统频率与额定频率进行对比，并将信号传递到 SOC 允许模块。如果电池 SOC 满足 $SOC > 20\%$ ，扰动发生时，当系统频率小于额定频率，且电池荷电状态满足放电的前提下，锂离子电池会进行放电，给系统直流环节补充功率；扰动发生时，当系统频率大于额定频率，且电池荷电状态满足充电的前提下，锂离子电池会进行充电，吸收系统直流环节多余功率。

根据储能系统接入风机发电系统位置的不同，可以分为直流侧接入式和交流测接入式两种，本文采用直流侧接入方式，如图 4-7。

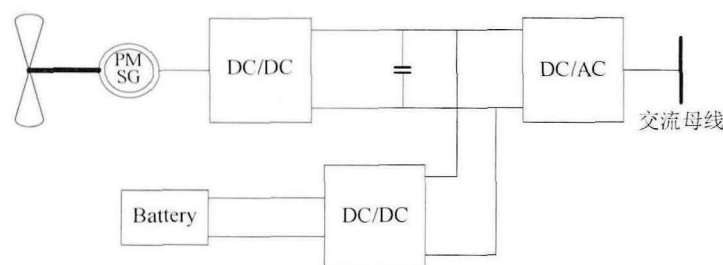


图 4-7 电池储能并网方式

4.3 考虑超级电容储能的风机惯量提升策略

4.3.1 超级电容器运行机理及其特性

4.3.1.1 运行机理

超级电容（SC，又称双电层电容器）的结构示意图如图 4-8 所示。其核心结构由两个独立导电层构成：多孔碳基材料与金属箔触点相连，两者间夹有薄物理分离器及电解液，离子迁移仅需通过极短有效距离。相较于传统电容器，SC 的电容值提升达 20-1000 倍，这得益于超薄分离器（无需传统大容量电介质）的设计。其充放电过程基于物理机理，通过双电层快速储能/释能，可实现毫秒级充放电响应。因此，SC 具有超高功率密度特性，主要应用于高脉冲功率场景。

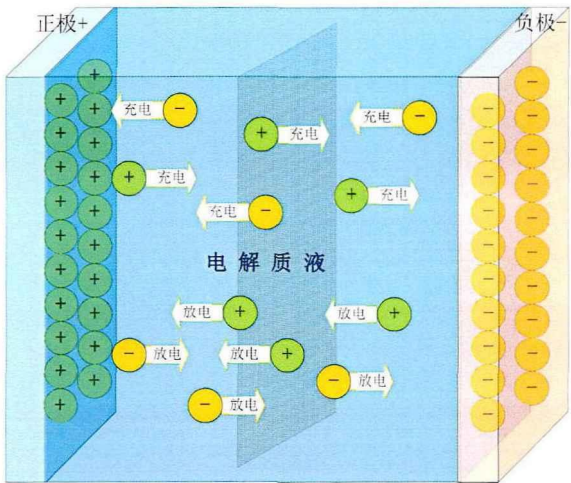


图 4-8 超级电容充放电原理

4.3.1.2 特性及参数分析

超级电容的性能参数主要包含储存容量、端电压、荷电状态、温升特性及循环寿命等关键指标。

超级电容端电压表达式：

$$V_{sc} = I_{sc}R + \frac{1}{C} \int I_{sc} dt \tag{4-2}$$

超级电容储存能量：

$$W = \frac{1}{2} CV_{sc}^2 \tag{4-3}$$

超级电容的荷电状态表示方法有安时积分法、开路电压法、卡尔曼滤波法、人工神经网络、滑膜观测器算法等^[63]，本章采用开路电压法。超级电容荷电状态可以表示为：

$$SOC_{sc} = \frac{V_{sc} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \tag{4-4}$$

如图 4-9 所示, 超级电容在充放电过程中呈现线性电量变化特征: 充电时容量递增, 放电时递减, 且功率输出稳定。这种特性使其能够有效抑制风电并网系统中的瞬态电能波动, 但其容量衰减迅速, 印证了超级电容高功率密度与低能量密度的技术特点, 特别适用于瞬间功率波动场景。

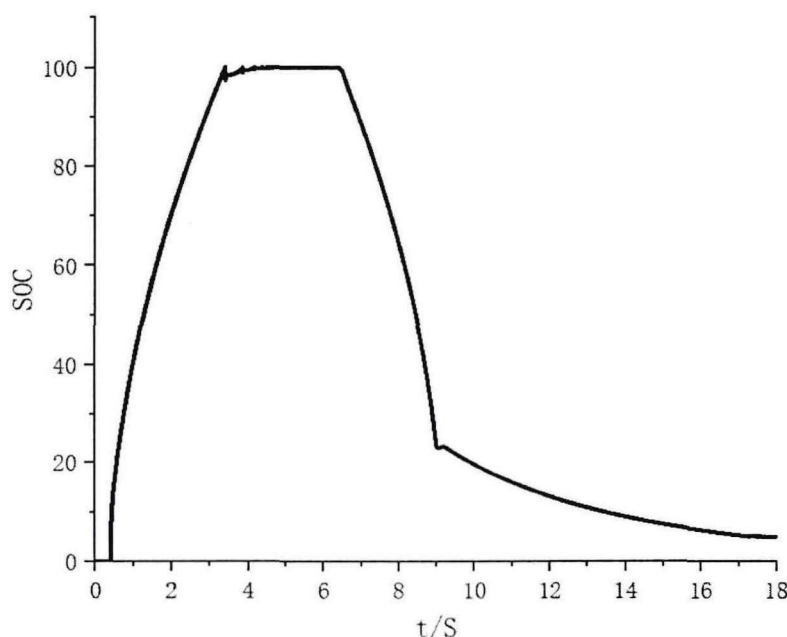


图 4-9 超级电容充放电过程中 SOC 变化

4.3.2 考虑超级电容器的风机直流侧控制

4.3.2.1 超级电容建模

超级电容器作为储能器件, 其工作状态受多参数影响。为实现对其充放电特性及内部机理的精确表征, 构建数学模型已成为储能领域的主流技术手段。当前主流的超级电容器模型主要包含电化学模型、黑匣子模型及等效电路模型三种类型^[76]。

电化学模型基于偏微分方程构建, 通过建立多物理场耦合方程组, 可定量解析电极界面双电层效应、电解质扩散传质过程及离子迁移机制。该模型优势在于能够实现储能介质理化特性的精确预测, 并揭示器件内电位场、浓度场与电荷分布的空间演变规律。黑匣子模型采用机器学习与模糊逻辑算法, 通过对大量实验数据的深度挖掘建立输入-输出映射关系。此类模型规避了对复杂微观作用机制的显式解析, 特别适合处理非线性动态系统的实时辨识与控制应用。等效电路模型通过 RC-L 网络拓扑结构实现电气特性的拟合, 典型架构包含等效串联电阻 (ESR)、等效电容 (SEC) 及扩散阻抗等核心元件参数。该模型以参数简洁、计算高效著称, 在电力电子系统集成与能量管理领域具有显著工程实用价值。因此

本文使用经典等效电路模型，如图 4-10。

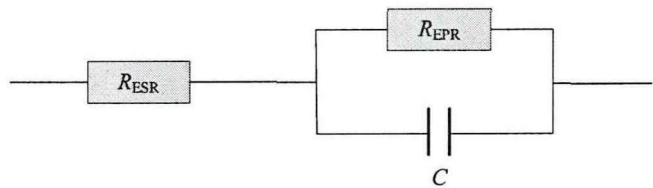


图 4-10 超级电容等效电路模型

超级电容器经典等效电路模型由串联内阻 R_{ESR} 、理想电容 C 及并联电阻 R_{EPR} 构成。其中， R_{EPR} 通过高阻值特性表征漏电效应，可量化自放电电流特征，并有效反映长期储能参数。

4.3.2.2 超级电容控制和并网接入方式

同样的，超级电容也通过 DC/DC 环节接入风机直流环节，通过开关控制实现能量双向传输。为了让超级电容器在系统发生功率缺额时及时做出反应，设计同如图 4-6 控制策略，其中 SOC 下限改为 5%。

超级电容系统采用直流侧接入方式，如图 4-11。

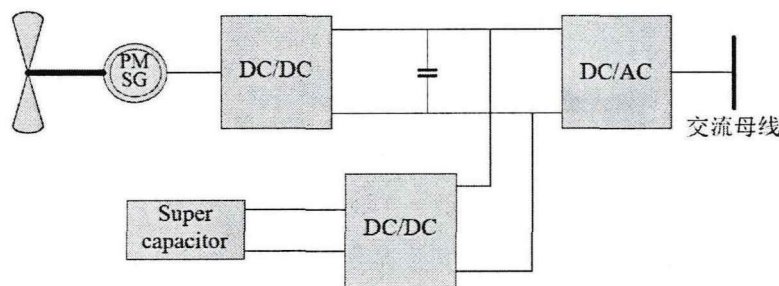


图 4-11 超级电容并网方式

4.4 联合储能风机惯量提升策略

由 4.2 和 4.3 节可知，锂离子电池储能和超级电容均能在系统发生扰动时给系统提供惯量支撑。锂离子电池功率快速释放阶段只占放电周期的一小段，且其大部分放电周期内放电功率较为稳定，系统不容易发生频率二次跌落。超级电容储能系统释放电能较快，在系统惯量响应阶段能够给与足够的功率支撑，但超级电容储能系统功率释放完毕后又会造成较大的功率缺额，容易引起频率的二次跌落。

此外，锂离子电池储能系统在释放完功率之后的恢复阶段（充电阶段），功率吸收较为缓慢，不易引起系统的频率二次跌落；但超级电容储能系统在功率恢复阶段，吸收系统功率的速度较快，容易引起系统频率二次跌落。结合两者特性，并考虑到系统可能会遭受二次功率扰动，因此需要超级电容储能系统在惯量响应阶段释放完功率后，应尽快补充功率，以应对下一次功率冲击。

综上所述，设计了锂离子电池储能系统和超级电容储能系统协调提升惯量的

策略，如图 4-12 所示。

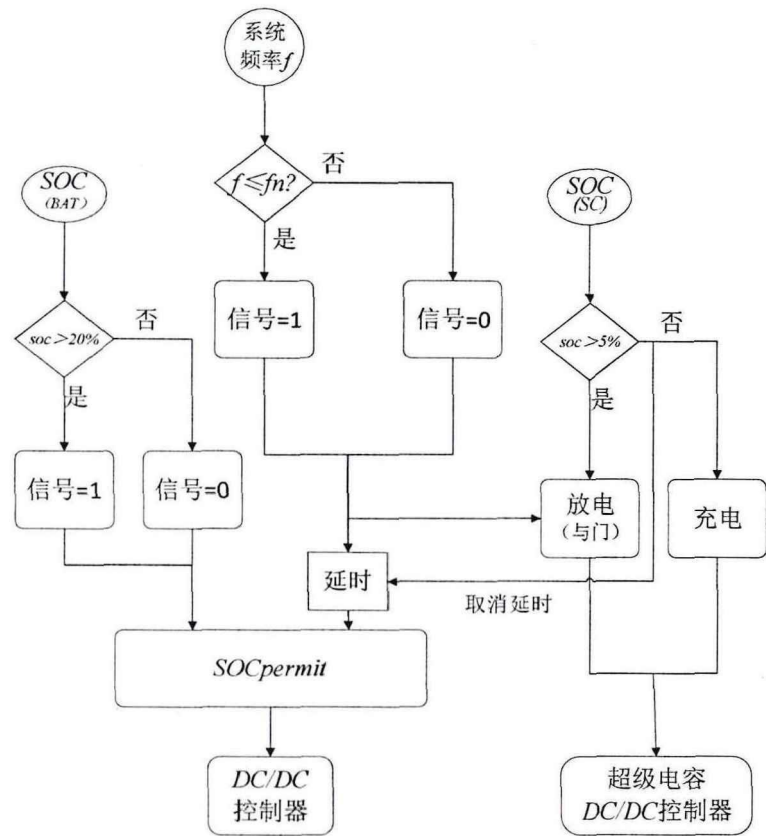


图 4-12 联合储能控制策略

该控制策略逻辑为：首先检测系统受到功率扰动后系统频率是否下降，若系统频率 f 大于等于频率额定值 f_n ，那么给出信号为 0，联合储能控制系统不启动；若检测到系统频率 f 小于频率额定值 f_n ，那么给出信号为 1，送到延时环节和超级电容 SC 放电环节。检测电池储能 SOC 是否大于 20%，若小于 20%，那么输出信号 0，电池储能进行充电，若大于 20%则输出信号 1 至 SOCpermit 环节，同时结合延时环节信号输出至储能电池 DC/DC 控制器，控制电池系统放电。与此同时，检测超级电容 SOC 是否大于 5%，若小于 5%则输出充电信号至超级电容 DC/DC 控制器，若大于 5%则输出放电信号至超级电容 DC/DC 控制器，控制超级电容系统充放电。

超级电容和电池储能并网依然采用直流电容并网方式，如图 4-13。

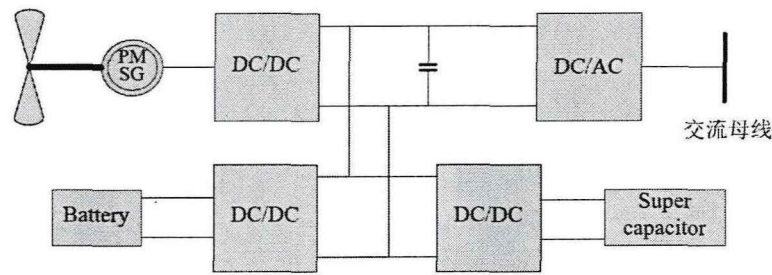


图 4-13 联合储能并网方式

4.5 仿真分析

在 PSCAD 中建立如图 4-14 所示的仿真模型，风机和交流侧同步机采用 CIGRE 标准算例模型。同步机额定容量设置为 50 MVA，数量为两台；风机额定容量为 2 MVA，数量为 50 台，同时直驱风机直流侧通过开关接入电池储能系统和超级电容系统；有功负荷 $P_{L1}=200$ MW，有功负荷 $P_{L2}=10$ MW，作为扰动功率。通过仿真试验分析验证本章直驱风机惯量支撑能力提升策略。

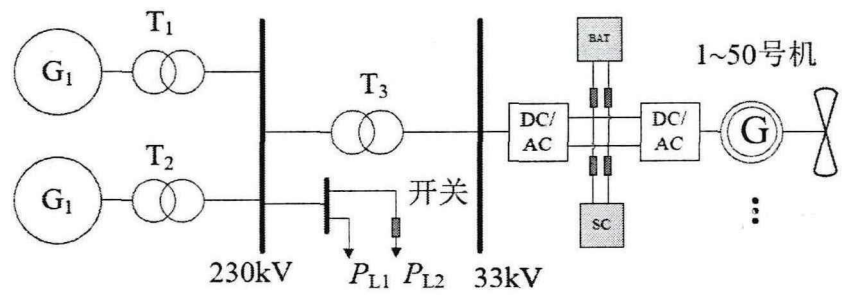


图 4-14 仿真结构图

仿真系统参数为：永磁直驱风机额定电压为 $V_n=690$ V，额定功率 $P_m=2$ MW，定子电阻 $R_s=0.0017$ pu，定子电感 $L_s=0.0364$ pu，转子电阻 $R_r=0.055$ pu，转子电感 $L_r=0.62$ pu，励磁电感 $L_m=1$ pu，固有惯量时间常数 $H_w=4$ s，额定角速度 $\omega_n=157.08$ rad/s，额定风速 $V_{wind}=10$ m/s，初始桨距角 $\beta_0=0^\circ$ ，同步发电机惯性时间常数 $H_J=6$ s， $X_d=1.014$ pu， $X'_d=0.314$ pu， $X_q=0.77$ pu， $X'_q=0.428$ ， $X''_q=0.375$ ， $T_{d0}=6.55$ s， $T'_{d0}=0.039$ s， $T_{q0}=0.95$ s， $T'_{q0}=0.51$ s， $R_s=0.002$ pu， $H_J=6$ s。变压器非标准变比为 1.0， $R_t+jX_t=0+j0.15$ pu；传输线路 $R_L=0.0001$ pu/km， $X_L=0.001$ pu/km， $B_c=0.00175$ pu/km；蓄电池额定容量为 0.2MVA，内阻为 120m Ω ，超级电容额定容量取 0.2MVA，内阻为 89m Ω 。

4.5.1 电池储能与超级电容的风机惯量提升对比分析

为了验证本章所提电池储能和超级电容控制策略的有效性，对比分析无虚拟惯量控制、跟网型虚拟惯量控制、附加电池储能惯量支撑、附加超级电容惯量支

撑对系统发生功率扰动后对系统频率的支撑效果。

4.5.1.1 电池储能惯量提升

将直驱风机分别设置为无虚拟惯量控制、跟网型虚拟惯量控制以及跟网型虚拟惯量控制基础上附加电池储能惯量支撑，在 20 秒时设置 10MW 功率扰动，得到仿真结果如下：

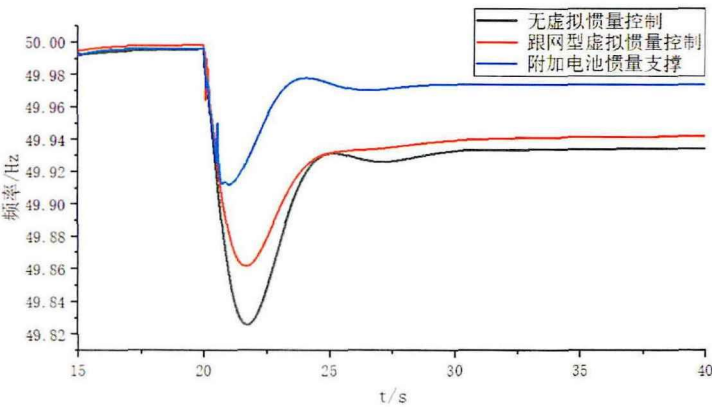


图 4-15 扰动后系统频率变化

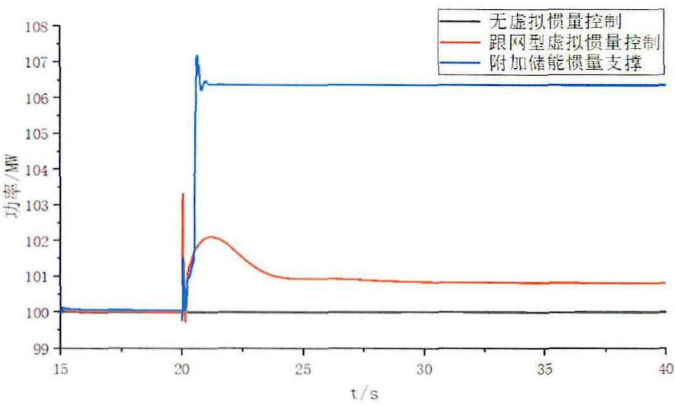


图 4-16 扰动后风机出力变化

如图 4-15 所示，系统发生功率扰动后，储能电池能迅速响应输出惯量支撑功率。相比于仅采取跟网型虚拟惯量控制，附加电池储能后，系统频率最低点提高了 0.05Hz，且惯量响应结束后可以稳定提升系统频率。不同于跟网型虚拟惯量控制惯量能量来源限于风机转子和转轮，如图 4-16 所示，附加电池储能可以提供额外的功率用于进行惯量支撑，相比于仅采取跟网型虚拟惯量控制，可以提供约 6.5 倍额外功率用于惯量支撑。此外，在电池储能预放电阶段，由于电池端电压和容量的迅速下降，可以提供为系统提供一部分冲击功率，抵消部分扰动功率，减缓系统频率下降速度。

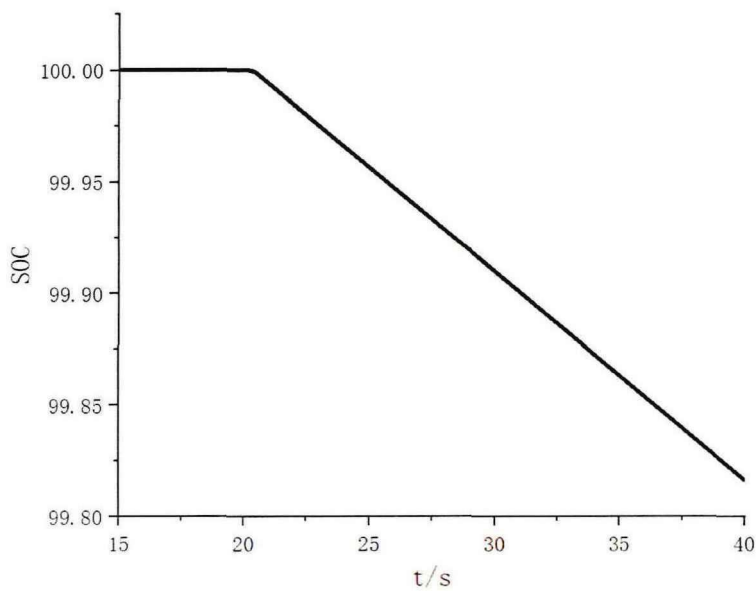


图 4-17 电池 SOC 变化

以上分析可以验证电池储能可以在扰动后为系统提供部分惯量支撑，但电池储能放电缓慢、稳定，如图 4-17 所示，其 SOC 变化缓慢，不能完全利用电池容量，需与超级电容搭配使用。

4.5.1.2 超级电容惯量提升

同电池储能仿真，通过开关开合，设置三类仿真模型，在 20 秒时设置 10MW 功率扰动，得到仿真结果如下：

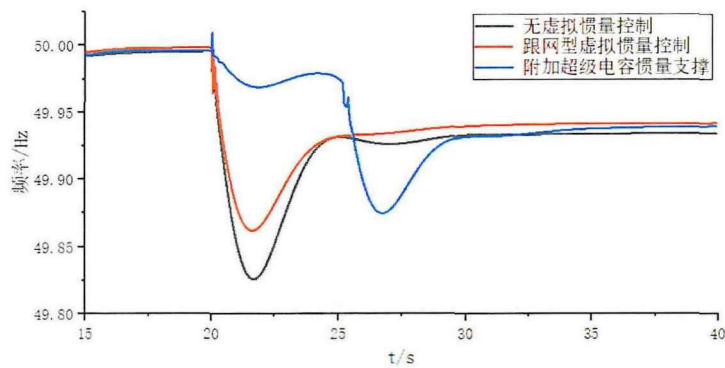


图 4-18 扰动后系统频率变化

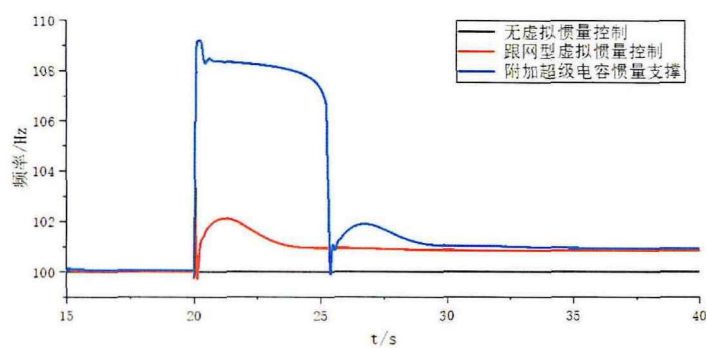


图 4-19 扰动后风机出力变化

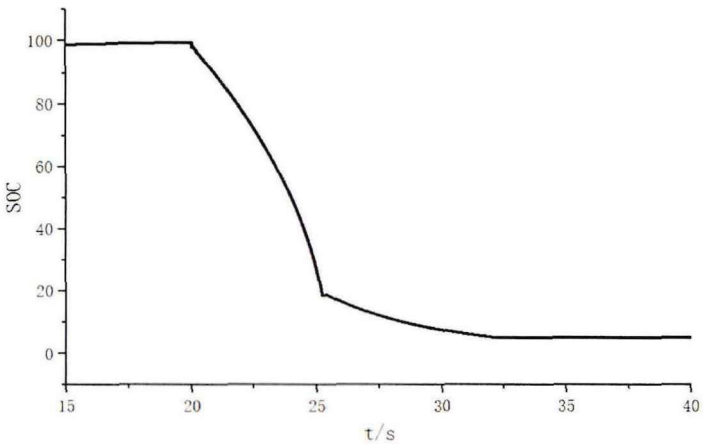


图 4-20 超级电容 SOC 变化

如图 4-18、图 4-19，扰动发生后，相比于仅采用跟网型虚拟惯量控制，附加超级电容在惯量响应阶段可以将系统频率最低点提升约 0.11Hz，可以提供约 8 倍的额外功率用于惯量支撑，惯量支撑能力远远强于跟网型虚拟惯量控制。仿真发现，超级电容可以在短时间内输出较高功率抵消部分扰动功率，但受限于其容量大小，高功率输出时间较短，导致系统频率出现二次跌落。如图 4-20 所示，惯量响应期间超级电容功率输出完毕之后，其 SOC 下降至 5%，不能再应对下一次的系统扰动。若为应对下一次功率冲击，超级电容放电完毕后立即充电，可能会造成较为严重的系统频率二次跌落，会引起系统频率奔溃。因此，超级电容应与电池储能搭配使用。

4.5.1.3 两种惯量提升方式对比

为方便分析电池储能和超级电容两者互补特性，设置无虚拟惯量控制、跟网型虚拟惯量控制、跟网型虚拟惯量控制基础上附加电池储能惯量支撑以及跟网型虚拟惯量控制基础上附加超级电容惯量支撑四类仿真实验，得到以下仿真结果。

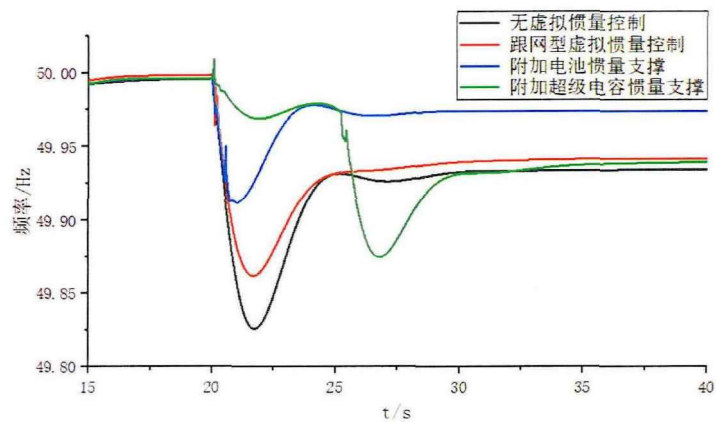


图 4-21 扰动后系统频率变化

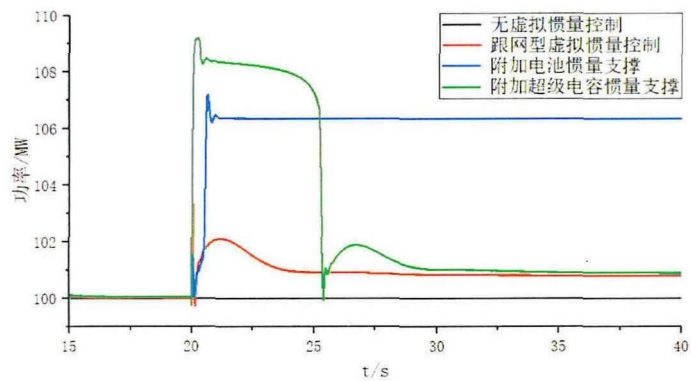


图 4-22 扰动后风机出力变化

如图 4-21 所示，电池储能和超级电容惯量支撑效果好于无虚拟惯量控制风机和跟网型虚拟惯量控制风机，虽然超级电容惯量响应结束之后产生了系统频率二次跌落，但系统频率最低点依然高于跟网型虚拟惯量控制风机。

结合图 4-22，惯量响应期间超级电容短时输出功率比电池储能多约 1.5MW，多提升系统频率最低点 0.057Hz。而惯量响应结束后，附加超级电容系统发生了频率二次跌落，输出功率回到跟网型虚拟惯量控制水平，但附加电池储能系统没有发生频率二次跌落，且出力稳定。若将电池储能和超级电容联合起来进行惯量支撑，则惯量响应阶段可以增强附加电池储能系统的惯量支撑能力，且电池稳定的功率输出可以减小附加超级电容系统发生的频率二次跌落程度，甚至可以实现超级电容惯量响应结束后立即进行充电，而不引起过于严重的系统频率二次跌落。

4.5.2 联合储能风机惯量提升效果分析

为了验证本章所提联合控制策略的有效性，通过如下 3 种工况对比验证本章所提策略、附加超级电容惯量支撑策略、附加电池储能惯量支撑策略、跟网型虚拟惯量支撑策略、无虚拟惯量支撑策略的抑制效果，扰动大小均为 10MW，扰动

时间为 20 秒，引起系统频率下降。

工况 1：扰动发生前超级电容已充能完毕，电池储能延迟 2.5 秒进行惯量响应。

工况 2：扰动发生前超级电容已充能完毕，电池储能延迟 2.5 秒进行惯量响应，扰动后超级电容再次充电。

工况 3：超级电容充电过程中发生扰动，取消 2.5 秒延迟，电磁储能直接参与惯量响应。

4.5.2.1 工况 1

工况 1，扰动前对超级电容和电池储能充电完毕，20 秒时系统发生扰动，电池储能 22.5 秒时进行惯量响应，建立仿真模型，运行得到如下仿真结果。

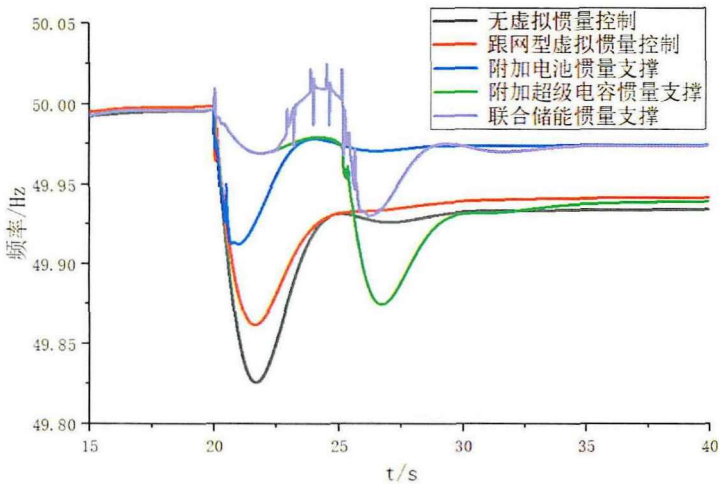


图 4-23 扰动后系统频率变化

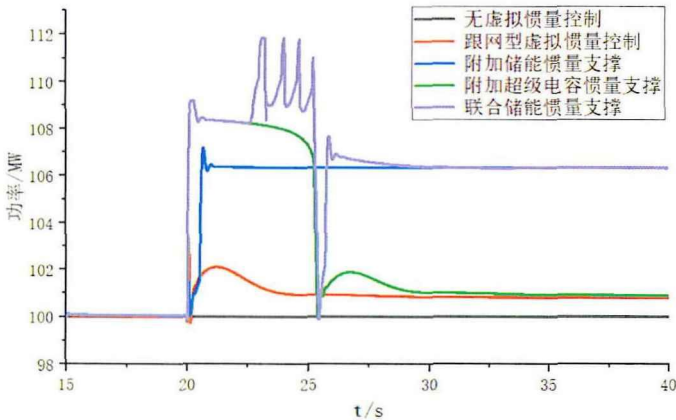


图 4-24 扰动后风机出力变化

如图 4-23，扰动发生后 2.5 秒内，只有风机跟网型虚拟惯量控制和超级电容参与惯量支撑，频率变化与仅附加超级电容一致，但频率最低点相比于电池储能提升至超级电容惯量支撑水平。扰动发生后 2.5 秒时，电池储能加入惯量响应，系统频率将大于系统额定频率，此时电池储能转为充电模式，避免系统频率过高，

若系统频率低于系统额定频率时再次转为放电模型，动态维持系统频率在额定频率附近。如图 4-24，电池储能加入后，超级电容放电结束之前，风机系统可以额外输出约 10MW 功率，可以完全抵消扰动功率。

超级电容放电结束后，系统频率出现二次跌落，但由于电池储能已动作，由超级电容放电结束带来的系统频率二次跌落程度被减小。对比不含附加电池储能的系统，联合储能控制策略可以将系统频率二次跌落最低点提升 0.05Hz，比附加电池储能系统扰动后的系统频率最低点高 0.015Hz。同时，超级电容放电结束后，电池储能能稳定输出约 6MW 功率。

综上分析可知，采用联合储能惯量支撑控制的风机系统，惯量支撑效果好于仅含超级电容或者电池储能的风机系统，并且一定程度上能够抵御由超级电容放电结束带来的系统频率二次跌落。

4.5.2.2 工况 2

工况 2，为了防止采用联合储能惯量支撑的系统发生功率扰动后，系统发生二次功率扰动，超级电容无法进行惯量响应造成系统频率严重下降，超级电容在系统频率二次跌落恢复之后及时进行充电。建立仿真系统，得到如下仿真结果。

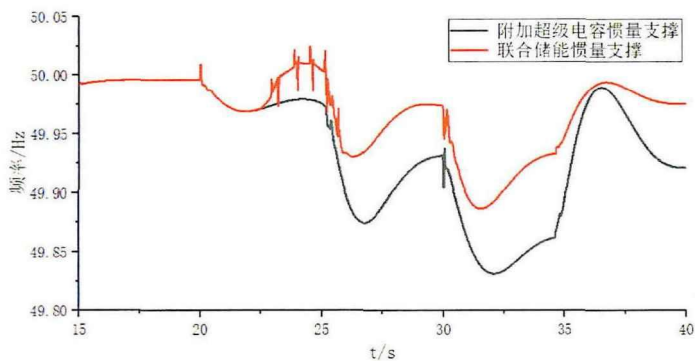


图 4-25 扰动后系统频率变化

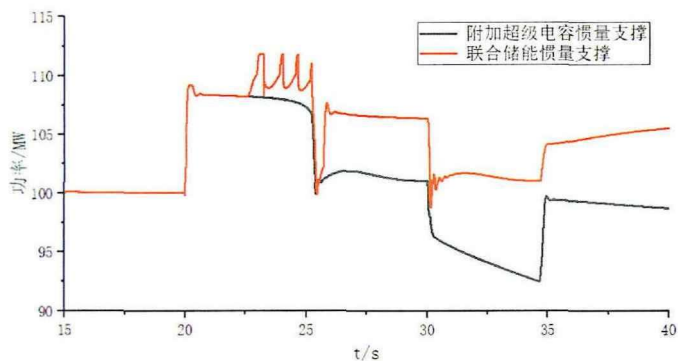


图 4-26 扰动后风机出力变化

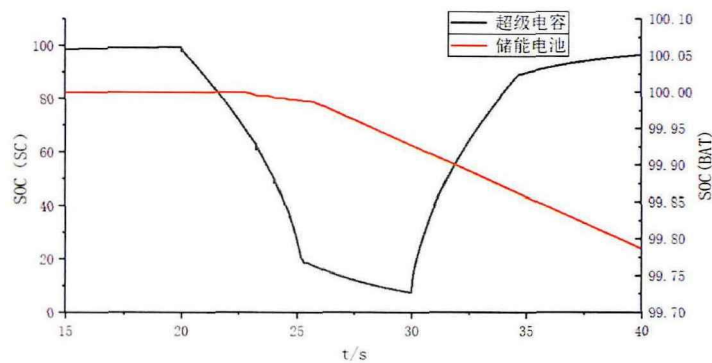


图 4-27 电池和超级电容 SOC 变化

如图 4-25、4-26 所示，系统频率二次跌落恢复后（30 秒时），超级电容进行充电。若风机系统采用仅附加超级电容惯量支撑策略，如图 4-27，由于超级电容充放电速率都较快，因此超级电容充电时系统频率跌落至 49.825Hz，风机系统输出功率跌落至 95MW 左右，即有风机系统入网的约 5MW 功率反向输送至超级电容供其恢复容量，系统频率恶化较为严重。

若采用联合储能惯量支撑策略，超级电容充电过程中所需功率可由电池储能提供。相比采用仅附加超级电容惯量支撑策略，由超级电容充电造成的频率跌落最低点提升 0.0625Hz，且风机系统入网功率维持在 100MW 以上，减轻了系统频率恶化趋势。

综上，采用联合储能惯量支撑策略可以使超级电容在系统频率二次跌落恢复之后立即充电，以应对下一次功率扰动，避免了由于超级电容充电造成的系统频率严重下降。

4.5.2.3 工况 3

工况 3，超级电容充电过程中系统发生功率扰动，此时电池储能解除延时，即时参与惯量响应。建立仿真模型，得到以下仿真结果。

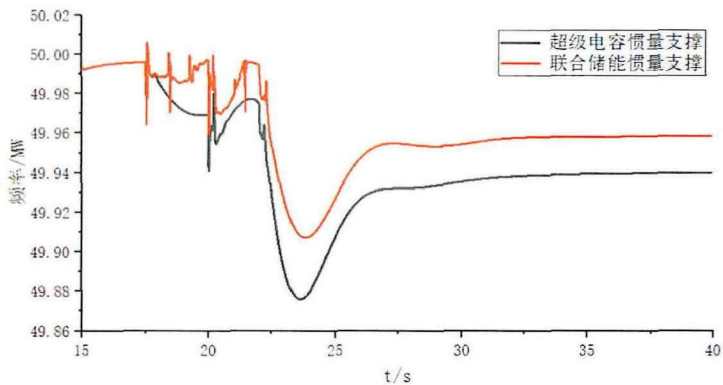


图 4-28 扰动后系统频率变化

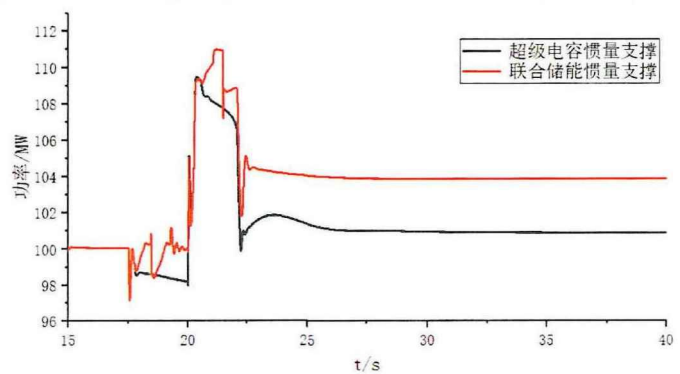


图 4-29 扰动后系统功率变化

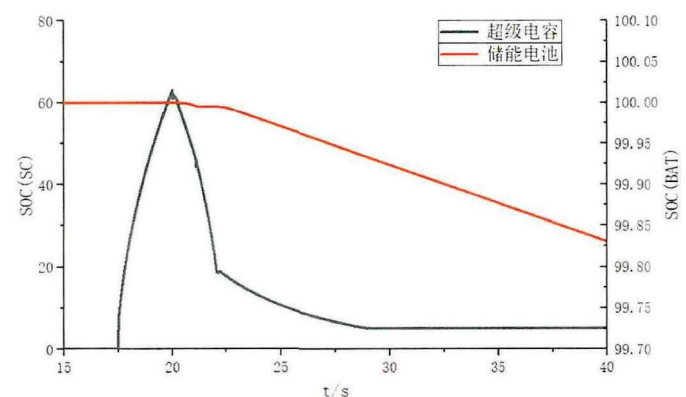


图 4-30 电池和超级电容 SOC 变化

如图 4-30 所示，20 秒之前超级电容进行充电动作，随后系统发生功率扰动，超级电容和电池储能同时放电进行惯量支撑。如图 4-28 所示，对比仅含附加超级电容惯量支撑的系统，采用联合储能惯量支撑控制的系统频率在扰动发生前维持在 50Hz 左右。由于电池储能在系统频率达到额定值之后受到超级电容充电影响，其状态在充电和放电之间切换，导致系统频率短时发生变化。扰动发生后，相比于仅含附加超级电容惯量支撑的系统，采用联合储能惯量支撑控制提高系统频率最低点约 0.017Hz，且在超级电容放电结束后的频率二次跌落中提升系统频率最低点约 0.034Hz，验证了采用联合储能惯量支撑系统可以提升系统跌落的频率。

如图 4-30 所示，采用附加超级电容惯量支撑策略时，扰动前风机还需提供 2MW 的充电功率，当采用联合储能惯量支撑策略时，超级电容充电所需功率基本可由电池储能提供。同样的，扰动发生后采用联合储能惯量支撑策略可以提供更多的惯量支撑功率，并在后续稳态状态中电池储能继续提供稳定的功率，以应对下次功率扰动或者超级电容二次充电。

综上，采用联合储能惯量支撑策略时，即使超级电容正在进行充电动作，扰动发生后，电池储能能够及时介入，为超级电容提供充电功率，同时协助超级电容进行惯量响应，提高了系统的惯量水平。

4.6 本章小结

本章分析了附加电池储能风机系统和附加超级电容风机系统，提出了基于跟网型虚拟惯量控制的联合储能惯量支撑策略，采用了 PSCAD 搭建仿真模型，并对附加电池储能风机系统和附加超级电容风机系统以及三种不同工况下的联合储能惯量支撑策略进行了仿真验证，得到以下结论：

（1）附加电池储能系统在惯量响应期间可以稳定输出功率，惯量支撑效果要好于跟网型虚拟惯量控制和无虚拟惯量控制，且惯量响应结束后可以继续稳定提供功率，可以提升稳定频率。但附加电池储能在惯量响应期间容量利用率比较低，需与超级电容搭配使用才能更好的发挥其作用。

（2）系统发生扰动后，附加超级电容系统能够短时提供较大功率，可以给系统提供较大惯量支撑，惯量支撑效果好于附加电池储能系统和跟网型虚拟惯量控制。但超级电容不能持续稳定放电，会造成系统二次频率下降，需搭配电池储能系统减小其造成的系统频率二次下降。

（3）最后，本章基于电池储能系统和超级电容系统特性，提出联合储能惯量支撑控制策略，在三种不同工况下，对比验证本章策略、单储能设备策略和跟网型虚拟惯量控制策略，结果表明，本章策略能够有效提升系统惯量水平，保障系统安全稳定运行。

第5章 结论与展望

5.1 结论

针对系统高风电渗透率场景，风机由于换流器的惯量响应隔离，造成系统惯量低的严重问题，进而增大了系统发生功率扰动时风机发生频率崩溃脱网的风险，威胁电力系统的安全稳定运行。针对上述问题，本文分析了跟网型虚拟惯量控制和构网型虚拟惯量控制下风机的惯量特性，提出了考虑电池储能和超级电容惯量特性的联合储能惯量提升策略，得到以下结论：

(1) 从直驱风机运行的机理出发，分析了跟网型风机虚拟惯量控制和构网型风机虚拟惯量控制特点；明确了风机等效惯量的定义，并以跟网型虚拟惯量控制模型为例，提出了直驱风机等效惯量计算方法。

(2) 提出了基于平均功率的风机等效惯量评估方法，分析了不同控制下风机的惯量特性。首先基于风机惯量支撑功率约束条件，推导了小信号模型下跟网型虚拟惯量控制风机和构网型虚拟惯量控制风机的 SFR 模型，分析了两种控制下系统的稳定性，同时给出了风机转子动能对惯量支撑功率的约束；考虑风机惯量支撑功率约束条件下，计算了同步机、两种跟网型虚拟惯量控制风机、构网型虚拟惯量控制风机的惯量支撑功率，得出了惯量支撑平均功率对应的控制参数取值；基于小信号模型分析了风电渗透率变化时，无虚拟惯量控制、两种跟网型虚拟惯量控制、构网型虚拟惯量控制下系统的频率响应特性。最后，基于 CIGRE 标准搭建了仿真模型，验证了分析结论的正确性。

(3) 提出了直驱风机附加联合储能惯量提升控制策略。首先分析了电池储能和超级电容的运行机理和特性，分别设计了两者的控制策略和并网方式；根据电池储能和超级电容的放电特性，设计具有互补特性的联合储能风机惯量提升策略。最后，搭建仿真模型，在三种不同工况下，对比验证本文策略、附加单储能设备策略，结果表明，本文策略能够有效提升系统的惯量水平，保障系统安全稳定运行。

5.2 展望

本文的相关研究内容未来仍可在以下方面进行深入研究：

(1) 风机虚拟惯量控制参数的优化。本文所采取的虚拟惯量控制参数仅满足两种控制下惯量支撑平均功率相同，不是风机虚拟惯量最大时的参数。通过优化控制参数，进而使两种虚拟惯量控制达到最佳效果。

(2) 考虑到联合储能惯量支撑控制策略中电池储能的容量没有得到最大化

利用，后续研究可基于本文控制策略进一步挖掘电池储能在一次调频方面的能力，进一步提高系统频率安全问题。

参考文献

- [1] 司俊龙, 艾琳, 邱辰. 2023 年中国风电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2024, 50 (12) :1-4+17.
- [2] 付红军, 陈惠粉, 赵华, 等. 高渗透率下风电的调频技术研究综述[J]. 中国电力, 2021, 54 (01) :104-115.
- [3] MORREN J, DE HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control [J] . IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (1): 433-434.
- [4] 李建华, 曹路, 杨仁炘等. 华东沿海风电场群电网主动频率支撑策略[J]. 中国电力, 2023, 56 (11) :49-58+112.
- [5] 辛悦, 彭乔, 刘天琪, 等. 基于周期性最大功率点检测的风电机组功率备用控制方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44 (02) :103-109+116.
- [6] 李世春, 王丽君, 薛臻瑶, 等. 基于惯量“削弱-补偿”责任分担的风电场虚拟惯量控制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51 (11) :30-37.
- [7] 李世春, 宋秋爽, 薛臻瑶, 等. 含风电虚拟惯性响应的新能源电力系统惯量估计[J]. 电力工程技术, 2023, 42 (02) :84-93.
- [8] 王国春, 董昱, 许涛, 等. 巴西“8.15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (24) :9461-9470.
- [9] National Grid Electricity System Operator. Technical Report on the events of 9 August 2019[R/OL]. (2019-09-06) [2024-01-16].
- [10] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (16) :5179-5192.
- [11] 侍乔明, 王刚, 马伟明, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (08) :2033-2042.
- [12] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (06) :2339-2359.
- [13] 王东旭. 构网型 PMSG 风电系统的频率支撑方法及黑启动策略研究[D]. 华北电力大学, 2023.
- [14] Tu J., Zhang J., Ma S., et al. Mechanism analysis and control measures of wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies[C]. 12th IET international Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016) , Beijing, 2016: 1-7.
- [15] 王刚, 侍乔明, 崔志勇, 等. 一种风力机虚拟惯量控制与传统发电机调速控

- 制的协调方法[J]. 电网技术, 2015, 39 (10) :2794-2801.
- [16] 刘毅力, 李丁, 李明贤, 等. RoCoF 下垂控制的直驱式风电系统惯量特性分析[J]. 电源学报, 2020, 18 (06) :94-104.
- [17] 杨仁炘, 张琛, 蔡旭. 具有频率实时镜像和自主电网同步能力的风场-柔直系统控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (2): 496-505.
- [18] JOUINI T, ARGHIR C, DÖRFLER F. Grid-friendly matching of synchronous machines by tapping into the DC storage[J]. IFAC – Papers On Line, 2016, 49 (22): 192-197.
- [19] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converter utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics , 2017 , 5 (4) : 1565-1577.
- [20] ARGHIR C , JOUINI T , DÖRFLER F . Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J] . Automatica , 2018 , 95 : 273-282.
- [21] DRIESEN J , VISSCHER K . Virtual synchronous generators[C]//Proceedings of 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-3.
- [22] CHEN Yong, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters[J]. Renewable Energy and Power Quality Journal, 2012, 1 (10): 734-739.
- [23] LIU Jia, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (5): 3600-3611.
- [24] ZHONG Qing-Chang , WEISS G . Synchronverters : inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (4): 1259-1267.
- [25] CHANDORKAR M C DIVAN D M ADAPA R Control. , , of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29 (1): 136-143.
- [26] 孙孝峰, 王娟, 田艳军, 等. 基于自调节下垂系数的 DG 逆变器控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (36): 71-78.
- [27] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, GHOSH A, et al. Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control

- loop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (2): 796-808.
- [28] ZHONG Qing-Chang . Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (4): 1281-1290.
- [29] ZHANG Lidong , HARNEFORS L , NEE H P . control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (2): 809-820. Power-synchronization.
- [30] JOHNSON B B, SINHA M, AINSWORTH N G, et al. Synthesizing virtual oscillators to control islanded inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (8): 6002-6015.
- [31] 桑顺, 张琛, 蔡旭, 等. 全功率变换风电机组的电压源控制(一): 控制架构与弱电网运行稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (16) :5604-5616.
- [32] 杨仁炘, 张琛, 蔡旭. 具有频率实时镜像和自主电网同步能力的风场-柔直系统控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (02) :496-506.
- [33] 鲁宗相, 姜继恒, 乔颖, 等. 新型电力系统广义惯量分析与优化研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (05) :1754-1776.
- [34] TIELENS P , HERTEM D V . The relevance of inertia in power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 999-1009.
- [35] 张武其, 文云峰, 迟方德, 等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (20): 6842-6855.
- [36] PAIDIE S N R, MARZOOGHI H, YU J, et al. Development and validation of artificial neural network-based tools for forecasting of power system inertia with wind farms penetration[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14 (4): 4978-4989.
- [37] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A , GÓMEZ-LÁZARO E , MULJADI E , et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109369.
- [38] MAKOLO P, ZAMORA R, LIE T T. The role of inertia for grid flexibility under high penetration of variable renewables - a review of challenges and solutions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 147: 111223.
- [39] 曾正, 邵伟华. 基于线性化模型的虚拟同步发电机惯性和阻尼辨识[J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (10): 37-43, 81.
- [40] 李世春, 徐松林, 李惠子, 等. 风电场等效虚拟惯量快速估计方法[J]. 电网技术, 2021, 45 (12): 4683-4691.

-
- [41] PHURAILATPAM C, RATHER H Z, BAHRANI B, et al. Estimation of non-synchronous inertia in AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy 2021, 12 (4) :1903-1914.
 - [42] LIU Muyang, CHEN JuMu, MILANO F. On-line inertia estimation for synchronous and non-synchronous devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36 (3) :2693-2701.
 - [43] ATTYA A B T , HARTKOPF T . Control and quantification of kinetic energy released by wind farms during power system frequency drops[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7 (3): 210-224.
 - [44] CAI Guowei, WANG Bo, YANG Deyou, et al. Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems , 2019 , 34 (6) : 4291-4299.
 - [45] YANG Deyou, WANG Bo, CAI Guowei, et al. Data-driven estimation of inertia for multiarea interconnected power systems using dynamic mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17 (4) :2686-2695
 - [46] PANDA R K, MOHAPATRA A, SRIVASTAVA S C Online estimation of system inertia in a power network utilizing synchrophasor measurements [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35 (4) :3122-3132.
 - [47] DU Pengwei, MATEVOSYAN J. Forecast system inertia condition and its impact to integrate more renewables [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (2) :1531-1533.
 - [48] TAVAKOLI M R B, POWER M, RUTTLEDGE L, et al. Load inertia estimation using white and grey-box estimators for power systems with high wind penetration[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45 (21) :399-404.
 - [49] TIAN Xinshou , WANG Weisheng , CHI Yongning , et al. Virtual inertia optimisation control of DFIG and assessment of equivalent inertia time constant of power grid [J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12 (15): 1733-1740
 - [50] 李世春, 唐红艳, 刘道兵, 等. 含风电虚拟惯性响应的电力系统等效惯性时间常数计算[J]. 可再生能源, 2018, 36 (10) :1486-1491.
 - [51] 李世春, 邓长虹, 龙志君, 等. 风电场等效虚拟惯性时间常数计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (07) :22-29.
 - [52] 蔡玮良, 程海锋, 潘智轩, 等. 基于转子动能与分布式储能的双馈风机频率控制策略[J]. 电气传动, 2023, 53 (11) :9-18.
 - [53] 刘严, 袁越, 傅质馨. 直驱永磁风电场并网运行的小干扰稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24 (05) :1-6+24.

- [54] 向如意, 杨金明, 王林, 等. 基于小信号模型的永磁直驱风电系统特征值灵敏度分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31 (05) :94-101.
- [55] 张祥宇, 付媛, 王毅, 等. 含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合 PSS 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30 (01): 159-169.
- [56] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (05): 27-33.
- [57] Y. Li, Z. Xu and K. P. Wong. Advanced Control Strategies of PMSG-Based Wind Turbines for System Inertia Support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 201732 (4) : 3027-3037.
- [58] 马玉路. 风储联合运行参与电网一次调频优化控制技术[D]. 山东理工大学, 2022.
- [59] 张祥宇, 邵孜建, 付媛. 风储并网发电系统的虚拟多段协同调速与频率安全支撑技术[J/OL]. 电工技术学报, 1-17[2025-02-26].
- [60] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, (15):54-58.
- [61] 于航.考虑锂离子电池特性的储能系统功率控制策略[D]. 东北电力大学, 2024.
- [62] Dang J, Seuss J, Suneja L, et al. SoC Feedback Control for Wind and Ess Hybrid Power System Frequency Regulation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics In Power Electronics, 2014, 2(1): 79-86.
- [63] LIU H, HU Z C, SONG Y H, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging de-mands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):3480-3489.
- [64] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法.电力系统保护与控制, 2015, 43(8):81-87.
- [65] 刘辉. 基于超级电容混合储能的分布式光伏发电系统[D].安徽理工大学, 2022.
- [66] Delille G , François B , Malarange G . Dynamic Frequency Control Support by Energy Storage to Reduce the Impact of Wind and Solar Generation on Isolated Power System's Inertia[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 931-939.
- [67] 周天沛, 孙伟. 高渗透率下变速风力机组虚拟惯性控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017(2):486-495.
- [68] 王宇. 超级电容与蓄电池混合储能系统的能量管理与控制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [69] 曹宇, 胡鹏飞, 蔡婉琪, 等. 基于 MMC 的超级电容与蓄电池混合储能系统及其混合同步控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(06):78-89.

-
- [70] 张勤进, 孙小童, 刘彦呈, 等. 蓄电池/超级电容混合储能系统协调控制策略[J]. 电源技术, 2020, 44(09):1345-1347+1365.
- [71] 杨海涛, 邵天章, 尹志勇. 蓄电池-超级电容混合储能系统惯性控制策略[J]. 电工技术, 2022, (04):42-45+48.
- [72] 彭海涛, 何山, 程静, 等. 考虑虚拟惯性时间常数和频率二次跌落的风电频率综合控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(08):509-517.
- [73] 朱瑛, 郭雅慧, 王志聪. 基于风力发电机典型控制策略的控制参数设计及稳定性验证[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17):51-60.
- [74] 鲍威宇. 风电惯量参与电网调频的控制研究[D]. 山东大学, 2021.
- [75] 陈东明. 电动汽车锂离子电池建模及 SOC 估算方法研究[D]. 河南理工大学, 2023.
- [76] J Wang, Zhang L, J Mao, et al. Fractional order equivalent circuit model and SOC estimation of supercapacitors for use in HESS. IEEE Access, 2019:1~1.