

适应风电接入的异步联网高压直流输电系统 自适应调频控制策略

王渝红, 赏成波, 廖建权, 朱玲俐, 李元琦, 朱 颜

(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:大规模风电接入高压直流送端系统将导致系统惯量降低,送端系统调频能力不足。为充分挖掘直流和风电协同调频的潜力,提高含风电高压直流送端系统的调频性能,提出一种基于频率轨迹规划的异步联网高压直流输电系统自适应调频控制策略。分析了含风电高压直流送端系统的频率控制特性;综合考虑风电主动频率支撑和直流辅助频率控制,以频率偏差和频率变化率为量化指标,生成参考频率轨迹;在此基础上,对频率轨迹进行区域划分,以参考频率轨迹为基准,实现高压直流输电对送端系统频率的自适应调节。基于MATLAB/Simulink平台搭建改进的两区域4机模型进行仿真分析,验证了所提策略的有效性和优越性。

关键词:高压直流输电;风电调频;频率轨迹规划;一次调频;异步电网

中图分类号:TM614;TM761+.2

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308003

0 引言

近年来,为进一步提高电网的可靠性、经济性和灵活性,通过高压直流输电进行异步联网得到了广泛的推广和应用^[1]。另一方面,以风电为代表的新能源大规模接入直流送端系统,使送端系统中风电渗透率不断提高。然而,这将导致系统的转动惯量水平和频率调节能力不断降低。当系统受到较大扰动时,送端电网将面临一次调频能力不足、频率振荡等问题^[2]。

由于风电机组一般通过电力电子设备接入电网,其频率响应特性与传统水火电同步机组具有较大区别。电力电子控制使风力机转速与系统频率完全解耦,不能为系统提供惯量支撑^[3-4];此外,风电机组为实现其经济性,通常运行于最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式,无法提供额外的有功功率来对系统的频率变化进行响应^[5]。虽然采用附加频率控制可以使风电机组在一定程度上参与系统的频率调节,如虚拟惯量控制^[6]、下垂控制^[7]、转子转速控制^[8]、虚拟同步机控制^[9-10]等,但是风电功率具有间歇性、随机性、不确定性等特征,难以及时保证系统的有功需求,且存在频率二次跌落风险。此外,受到单台发电装置容量的限制,风电机组通常需要与一定的储能系统协调控制或者留有一定功率备用^[11-12],存在协调过程复杂、经济性差、调节能力有限等不足。

基于电网换相换流器的高压直流输电系统具有

对直流功率的快速可控性,调节容量大,灵活性强,在实现区域互联电网之间的快速频率支援和提高功率传输稳定性方面具有较大优势,为解决含风电送端系统调频能力不足和频率二次跌落问题提供了新的思路。

目前,高压直流输电参与异步送端电网频率调节的控制方法主要分为基于下垂控制的附加频率控制^[13-15]和基于比例积分(proportional integral, PI)控制的直流频率限制控制(frequency limit control, FLC)^[16-18]。其中,文献[13]针对直流孤岛运行系统,提出了一种基于下垂控制的直流附加频率控制策略。文献[14]基于预测模型,提出了一种针对含大规模风电的异步直流电网送端系统的多源协同调频策略。文献[15]提出了一种直流附加频率控制和自动发电控制(automatic generation control, AGC)配合的辅助频率控制策略,利用高压直流输电功率快速调制和短时过载能力快速平衡风电随机波动引起的频率波动。虽然上述基于下垂控制的控制方法能够使直流系统快速响应频率变化,但下垂系数一般固定,不能及时跟随系统的频率变化动态调整出力。文献[16]研究了火电直流孤岛系统中汽轮机参数、直流FLC和机组一次调频对系统频率稳定性的影响。文献[17]以云南异步联网为背景,对直流FLC的调频特性及应用策略进行了分析,证明了直流FLC可以有效改善系统的频率稳定性。文献[18]提出了一种计及直流调节成本的直流FLC参与辅助调频服务策略,实现了调频需求的经济分配。虽然直流FLC利用了高压直流输电的快速调节能力,改善了送端系统的频率稳定性,但直流FLC目前主要用于送端为孤岛水电或孤岛火电系统的情况,与大规模风电接入送端系统场景下的频率控制特性存在明

收稿日期:2023-02-16;修回日期:2023-06-15

在线出版日期:2023-08-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2400800)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2021YFB2400800)

显差异,难以适应大规模风电接入下低惯量电力系统的频率稳定需求。

频率轨迹规划(frequency trajectory planning, FTP)控制是一种以参考频率轨迹为导向的控制方法,其将系统频率与几个预定义的规划参数联系起来,可实现频率跟踪控制。文献[19]针对独立电力系统,提出了一种基于FTP的频率稳定改善策略,该策略可通过跟踪规划的频率轨迹,控制逆变器提供系统所需的惯性和阻尼支撑。但其仅针对基于逆变器的独立电力系统,不能直接应用于高压直流输电系统辅助频率控制。

针对以上问题,本文提出一种基于FTP的异步联网直流自适应调频控制策略。该策略综合考虑风电主动频率支撑和直流辅助频率控制,选择反映系统阻尼和惯性的频率偏差和频率变化率为指标,并对系统的参考频率轨迹进行推导;当遭遇较大扰动时,风电和直流同时参与系统一次调频,在风电机组参与调频的转速恢复阶段,以参考频率轨迹为基准调整直流系统的出力,避免系统频率发生二次跌落;通过对频率轨迹进行分区,实现送端系统频率的自适应控制。最后,在两区域4机模型基础上搭建含风电异步互联电网模型,验证本文所提策略的有效性。

1 含风电高压直流送端系统频率特性分析

1.1 含风电高压直流送端系统频率特性模型

以目前应用较为广泛的双馈感应风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)为例,DFIG在MPPT模式下正常运行时,风轮、齿轮箱和发电机转子储存大量动能,可以表达为:

$$E = \frac{1}{2} J_w \omega_r^2 \quad (1)$$

式中: E 为旋转组件动能; J_w 、 ω_r 分别为风电机组旋转组件的整体转动惯量和等效转速。按照同步机惯性常数计算方法,风电机组惯性常数约为3~6 s,且受风速影响较大^[20]。相对于传统同步机组,DFIG的转子转速变化范围更大,其为系统提供惯量支撑的潜力更强,但其转子转速由转子侧变流器控制,与系统频率解耦,在常规控制下能为送端系统提供的惯量支撑几乎为0。

暂不考虑风电高渗透率的影响,忽略调速器控制、限幅等非线性环节与二次调频,可以对送端系统的频率模型进行简化,如图1所示^[21]。其中涡轮机和调速器均表示传统水火电机组提供的调频效应。图中: $M=2H$, H 为惯性时间常数; D 为负荷频率效应系数; a 为涡轮机特征系数,对于水轮机 $a=-2$,对于汽轮机 $0 < a < 1$; T 为涡轮机等值惯性时间常数; $1/R$ 表示简化的调速器; ω_{ref} 为转速参考值; $\Delta\omega_r$ 为转速变

化量; ΔP_m 、 ΔP_L 分别为原动机输出功率变化量、负荷扰动变化量, ΔP_e 为两者之差。

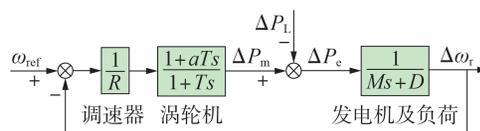


图1 送端系统频率特性简化模型

Fig.1 Simplified model of frequency characteristics of sending-end system

对送端系统而言,直流外送相当于负荷,由于直流一般采用恒功率外送,无法提供负荷频率效应,且大规模风电接入送端系统时,系统的惯量水平也会随之降低。同时考虑风电接入和直流系统的影响,需要在频率特性模型中加入表征风电渗透率和直流外送功率的变量。假设风电渗透率提高是通过关停同步机组实现的,定义风电系数 K_1 和直流系数 K_2 分别为:

$$K_1 = S_{wind}/S_{load} \quad (2)$$

$$K_2 = S_{DC}/S_{load} \quad (3)$$

式中: S_{wind} 为风电出力; S_{load} 为系统负荷功率; S_{DC} 为直流外送功率。风电渗透率越高,直流外送比例越大,则 K_1 、 K_2 越大, K_1 、 K_2 的取值范围均为 $[0,1]$ 。图1中的简化模型是以发电机容量为基准的,在不考虑风电和直流的调频能力时,若采用系统负荷功率为基准,则可以得到计及风电和直流影响的系统频率特性简化模型,如图2所示。

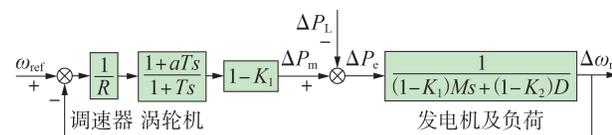


图2 计及风电和直流影响的系统频率特性简化模型

Fig.2 Simplified model of system frequency characteristics considering effects of wind power and DC

此模型简化方式结构简单且易于理解,但由于忽略了风电机组频率响应能力及其随机性和波动性对系统的其他影响,仅考虑对系统惯性的削弱,并假设风电渗透率提高是通过关停同步机组实现的,所以此简化方式仅适用于定性分析风电机组对系统频率特性的影响。

由图2可知,当大规模风电接入送端系统时,其惯量水平大幅降低,并且由于直流外送导致负荷频率效应减弱,送端系统的频率响应特性也会随之恶化。为了能够利用储存在DFIG转子中的旋转动能参与电网调频,风电机组通常采用虚拟惯量控制和下垂控制,如附录A图A1所示。

当系统频率偏离额定值一定程度时,风电机组通过释放其储存的转子动能参与系统频率调节。此

外,还有通过偏移 MPPT 运行模式预留功率备用的超速和桨距角控制。虽然转子动能控制不需要功率备用,但在转速恢复阶段容易导致系统频率发生二次跌落,而功率备用控制难以最大限度地利用风能,所以有研究提出了多种控制策略组合的控制方法^[22]。本文采用虚拟惯性控制和桨距角控制相结合的方法模拟同步机组惯性响应和一次调频过程,使风电机组参与系统调频。

1.2 高压直流输电参与调频控制特性分析

以基于电网换相换流器的传统直流为例,通常在整流侧采用定电流控制,在逆变侧采用定电压控制。在整流侧,换流站的控制器的比较直流电流参考值和实测值,形成能够跟踪参考电流的触发角指令信号,对高压直流输电进行控制。当需要进行直流功率调整时,将直流功率变化需求量转变为直流电流的参考变化量,与换流站控制器的参考值进行叠加,改变触发角指令信号,从而实现直流功率的快速可控性,使不同区域间能够通过直流系统进行功率支援,控制逻辑如附录 A 图 A2 所示^[20]。

在高压直流输电参与送端系统频率控制方法中,基于下垂控制和基于 PI 控制的频率控制器框图分别如附录 A 图 A3、A4 所示^[23]。高压直流输电通过下垂控制参与系统频率响应时,其调频功率主要由比例系数 K_p 决定。高压直流输电通过 PI 控制参与频率响应时,其调节效果主要由 K_p 和积分系数 K_i 共同决定。本文主要选择基于下垂控制的直流调频控制方法,并与 FTP 控制进行协调配合,研究 FTP 控制在直流辅助调频中的应用方法和特性。

2 基于 FTP 的直流调频控制策略

2.1 送端电网临界频率轨迹分析

对于不同的频率控制方法,直流送端系统受其自身产生的总惯性和阻尼的影响,其频率响应表达式通常包括扰动前的稳态分量 f_0 (通常为额定频率 f_N) 和扰动引起的指数衰减暂态分量。其中,暂态分量的幅值 F 与扰动水平和系统总阻尼有关,衰减率 σ 同时与系统总惯性和阻尼有关。系统在高频情况下的频率安全极限主要由发电机组决定,低频情况下主要由负荷决定。为简化分析,本文在考虑频率安全区域界限时不区分高低频的主要影响因素。对送端系统的临界频率轨迹进行分析,可以确定相应的频率安全区域,具体分析过程见附录 B。由附录 B 可得符合电网安全稳定要求的临界频率表达式为:

$$f = f_0 + F_{cr}(1 - e^{-\sigma t}) \text{sign}(R) \quad (4)$$

式中: f 为系统频率; t 为时间; F_{cr} 和 σ_{cr} 分别为临界频率偏差和临界频率衰减率; R 为频率变化率; $\text{sign}(x)$ 为符号函数,其表达式见附录 B 式(B2)。

设 $f_0 = f_N$, 则由式(4)可以定义系统的临界频率

轨迹和频率安全区域如附录 C 图 C1 所示,图中 f_{cr}^d 、 f_{cr}^u 分别为发生正功率扰动和负功率扰动时的临界频率轨迹。当 $f_{cr}^d \leq f \leq f_{cr}^u$ 时,由 2 条临界频率轨迹所围成的区域即为系统运行的频率安全区域。由于可以明确系统频率轨迹的安全运行区域,频率控制的目标由设计惯性、阻尼控制及其参数转变为确保系统频率轨迹限制在图 C1 所定义的频率安全区域内。

2.2 系统参考 FTP

根据不同电网的安全稳定要求,可以确定不同的临界频率轨迹,但由于控制过程中系统实际频率轨迹与计划频率轨迹不可避免地存在差异,并且频率检测系统和 FTP 触发模块具有一定的时延,如果直接以临界频率轨迹作为 FTP 控制的参考频率轨迹,系统频率可能会超出安全区域,影响系统的正常运行。为了保证系统的频率稳定性,需要在规划参考频率轨迹时留有一定的安全裕度。规划参考频率轨迹时的最大频率偏差 F_{ip} 和最大频率变化率 R_{ip} 分别为:

$$\begin{cases} F_{ip} = F_{std} - F_{mar} \\ R_{ip} = R_{std} - R_{mar} \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_{std} 和 R_{std} 分别为电网导则指定的频率偏差和频率变化率继电器动作安全阈值, F_{mar} 、 R_{mar} 分别为对应的安全裕度。 F_{ip} 、 R_{ip} 可根据不同电网的频率质量要求确定。

参考频率轨迹的详细推导过程见附录 D,由附录 D 可得参考频率轨迹为:

$$f_{TP} = \begin{cases} f_N + F_{ip} - (f_N - f_0 + F_{ip}) e^{-\frac{R_{ip}}{F_{ip} + f_N - f_0}(t - t_0)} & \text{sign}(R_0) = 1 \\ f_N - F_{ip} - (f_N - f_0 - F_{ip}) e^{-\frac{R_{ip}}{F_{ip} - f_N + f_0}(t - t_0)} & \text{sign}(R_0) = -1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: R_0 为 t_0 时刻系统频率变化率。式(6)中的参数仅包括规划参考频率轨迹时的最大频率偏差 F_{ip} 和最大频率变化率 R_{ip} ,以及较为容易检测的 t_0 和 f_0 ,大幅简化了控制参数的选取过程。

2.3 基于 FTP 的高压直流输电自适应调频策略

为适应大规模风电接入后直流送端电网的频率稳定需求,本文提出了一种基于 FTP 的异步联网直流自适应调频控制策略。该策略以频率指标为导向,直接根据频率偏差和频率变化率指标实现直流系统频率控制,保证异步送端电网具有足够的惯性和阻尼。由于高压直流输电功率调制在影响送端系统频率特性的同时,也会使受端系统受到一定扰动,需要考虑其对受端系统的影响,但相对于高比例外送弱送端系统(如西南电网),受端系统(如华中电网)的网架结构相对稳定,具有较为充足的备用容量,能够承受一定功率扰动。因此,本文考虑只在送端电网采用直流频率自适应控制,并将直流看作一

种优质调频资源参与频率调节。基于FTP的直流自适应调频策略如附录E图E1所示。

对于送端电网中扰动较小的情况,系统中的惯性和阻尼缺额较小,系统频率偏差和频率变化率均在安全区域内,高压直流输电调频控制系统采用经典下垂控制方法,能够满足系统的频率稳定要求;相反,当送端系统具有较大的频率偏差和频率变化率时,表明系统的惯性和阻尼效应不足,将启用FTP控制模式,利用高压直流输电的快速调节能力,将频率指标限制在安全区域内,同时防止频率发生二次跌落。在后一种情况下,FTP控制模块将根据式(6)生成一个参考频率轨迹,其频率偏差和频率变化率满足电网安全稳定导则的限制,根据参考频率轨迹对系统的频率进行定向调节。自适应调频策略具体流程如图3所示。图中: F_{act} 、 R_{act} 分别为FTP模块的触发阈值。

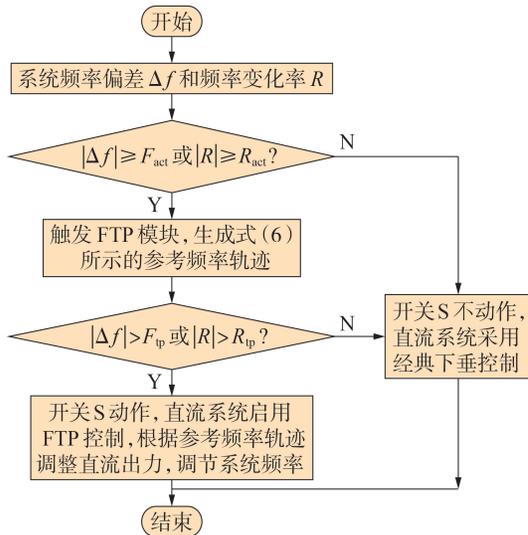


图3 自适应调频策略执行流程图

Fig.3 Flowchart of adaptive frequency modulation strategy execution

根据系统频率指标的大小,以系统受到正功率扰动为例,根据FTP模块动作参数 F_{act} 、 R_{act} 以及电网导则指定的频率偏差和频率变化率继电器动作安全阈值 F_{std} 、 R_{std} ,将频率轨迹划分为4个不同的区域,如附录E图E2所示,具体分析如下。

1)频率稳定区: $|\Delta f| < F_{act}$ 且 $|R| < R_{act}$ 。

在此区域内,频率偏差和频率变化率均在系统允许的的稳定范围内,一般和频率调节死区类似,系统受到的扰动较小,具有足够的惯性和阻尼支撑,能够保持频率稳定性。在此情况下,经典下垂控制方法足以满足系统的频率稳定要求,不需要提供额外的惯性阻尼效应,FTP模块的触发信号为0,FTP不参与系统调频。

2)频率监管区: $F_{act} \leq |\Delta f| \leq F_{tp}$ 或 $R_{act} \leq |R| \leq R_{tp}$ 。

随着功率扰动加大,系统的频率轨迹会穿过频率稳定区进入频率监管区,最终保持在该区域内或者超过该区域,系统频率稳定风险加大,需要提前确定系统的参考频率轨迹并采取相应的措施。因此,频率轨迹进入该区域时,FTP触发信号为1,根据式(6)生成参考频率轨迹,将实时频率轨迹 f_{FTP} 和参考频率轨迹 f_{TP} 进行连续比较,若 f_{FTP} 始终位于 f_{TP} 包裹的区域内,则开关S不动作,保持下垂控制,当 $|\Delta f| > F_{tp}$ 或 $|R| > R_{tp}$ 时,开关S切换到FTP控制模块。

3)FTP控制区: $F_{tp} < |\Delta f| < F_{std}$ 或 $R_{tp} < |R| < R_{std}$ 。

随着系统受到的扰动进一步加大,频率轨迹可能从频率监管区达到FTP控制区,该区域虽然存在较大频率稳定风险,但还未达到切机减载的相关阈值。此时,触发FTP控制模块,开关S动作,使直流频率控制系统切换到FTP控制模式,控制器根据参考频率轨迹,生成用于高压直流输电参与调频的参考功率值,调节系统的频率偏差和频率变化率向规划参考值 F_{tp} 和 R_{tp} 靠近,为系统提供额外的惯性和阻尼支撑,保证系统的频率稳定。

4)频率禁止区: $|\Delta f| \geq F_{std}$ 或 $|R| \geq R_{std}$ 。

当系统受到更大扰动时,如果没有额外的惯性和阻尼支撑,系统很有可能进入该区域,在这种情况下,将会触发保护装置,不可避免地发生切机减载。因此,对于系统固有惯性和阻尼不足时发生的大扰动,系统必须提供足够的支撑,从而增强系统的频率稳定性。本文所提控制策略充分利用直流系统的快速调控能力,直接根据参考频率轨迹进行定向调节,可以有效改善系统的频率性能。

2.4 FTP控制参数分析

高压直流输电在参与调频的同时,也会对自身造成一定影响,为保证直流系统的稳定运行,需要对FTP控制参数进行分析,具体的分析过程见附录F。由附录F可知,当控制器参数同时满足式(F5)和式(F6)时,既能够保证系统频率稳定,又能够保证直流系统稳定运行。

3 仿真分析

为验证本文所提FTP控制策略的有效性,基于MATLAB/Simulink仿真平台,参照文献[24]搭建如附录G图G1所示的改进两区域4机异步互联电网模型。其中,送端系统包含2台装机容量为900 MW的同步机 G_1 、 G_2 ,并接入额定容量为800 MW的风电场 G_w ,模拟异步送端电网大规模风电接入的场景。受端系统包含2台装机容量为900 MW的同步机 G_3 、 G_4 ,直流输电线路的额定容量为1000 MW。所有同步机均装有调速系统,依据电网频率控制相关要求,FTP仿真参数设置如附录G表G1所示。

在风电调频控制保持不变的情况下,针对高压直流输电分别采用本文FTP控制、下垂控制、虚拟惯性控制以及高压直流输电不参与调频4种不同控制策略进行仿真对比,在不同扰动场景下分析不同控制策略下的调频效果,验证本文所提控制策略的有效性和优越性。

3.1 小功率负荷扰动分析

系统稳定后,以负荷突增为例,考虑在如下工况下进行系统频率响应特性仿真:当 $t=5$ s时,高压直流送端系统受到40 MW阶跃负荷扰动,分别对送端系统频率、频率变化率、直流系统有功调制量进行仿真对比分析,系统频率、频率变化率分别如图4、5所示,直流有功调制量如附录G图G2所示。

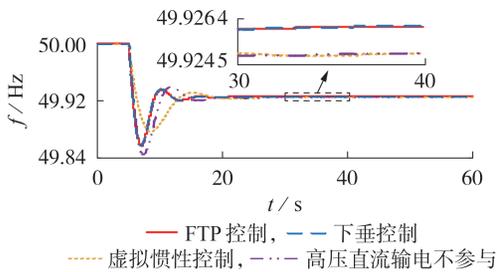


图4 小功率阶跃负荷扰动时送端交流系统频率
Fig.4 Frequency of sending-side AC system under low-power step load disturbance

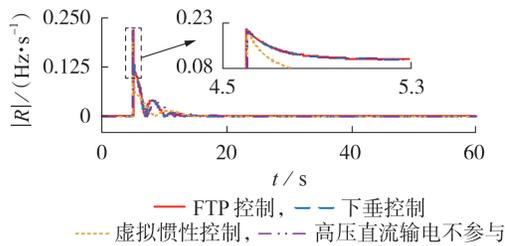


图5 小功率阶跃负荷扰动时送端交流系统频率变化率
Fig.5 Rate of change of frequency of sending-end AC system under low-power step load disturbance

由图4、5可知:在40 MW小功率负荷扰动下,送端系统的最低频率始终保持在49.84 Hz以上,最大频率偏差小于0.16 Hz,系统的最大频率变化率绝对值 $|R|$ 为0.22 Hz/s,系统最大频率和最大频率变化率均未达到FTP动作值 F_{act} 和 R_{act} ,满足 $|\Delta f| < F_{act}$ 且 $|R| < R_{act}$ 。所以在发生40 MW小功率负荷扰动情况下,系统频率轨迹位于区域划分中的“频率稳定区”,系统具有比较充足的惯性和阻尼支撑,能够在不改变控制方法的情况下保持频率稳定。此时,图E1所示的控制框图中FTP控制触发判断模块的触发信号为0,没有生成参考频率轨迹,同时开关S不动作,高压直流输电采用经典下垂控制参与系统的频率调节,FTP控制策略不作用。故系统在FTP控制策略下的频率响应和直流系统有功调制量与采用下垂控

制时一致,从侧面验证了所提控制策略的有效性。

由图4、5及图G2对比可见,相对于高压直流输电不参与调频的情况,采用频率附加控制策略使高压直流输电参与频率响应可以有效改善系统的频率特性,提升系统的最低频率及稳态频率。其中,高压直流输电采用虚拟惯性控制的改善效果较好,除稳态频率值稍低之外,其系统最低频率和频率变化率均优于下垂控制,直流系统的有功调制量能够较好地跟随系统的频率变化进行响应,为系统提供合适的频率支撑。

3.2 大功率阶跃扰动分析

针对更为严重的情况,同样以负荷突增为例,考虑以下工况:当 $t=5$ s时,对直流送端系统施加200 MW大功率阶跃负荷扰动,分别对送端系统频率、频率变化率、直流系统有功调制量进行仿真对比分析,仿真结果如图6、7和附录G图G3、表G2所示。

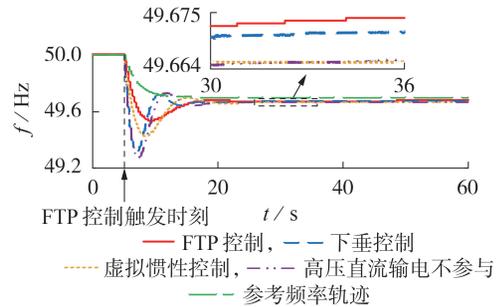


图6 大功率阶跃负荷扰动时送端交流系统频率
Fig.6 Frequency of sending-end AC system under high-power step load disturbance

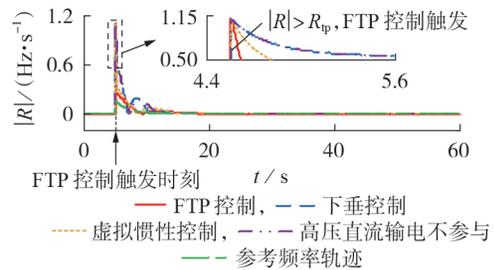


图7 大功率阶跃负荷扰动时送端交流系统频率变化率
Fig.7 Rate of change of frequency of sending-end AC system under high-power step load disturbance

图6和图7给出了系统的参考频率轨迹,用以与FTP控制进行对比分析,验证本文所提策略的有效性。由于参考频率轨迹由预定义参数计算而来,仅包括参考频率和参考频率变化率,与仿真中的直流系统有功调制量无直接关系,故图G3中不对参考频率轨迹对应的直流调制量进行分析。

由图6、7和图G3可知:在大功率阶跃负荷扰动下,当高压直流输电未投入附加频率控制时,直流系统有功调制量为0,直流输送功率保持不变,不能参

与系统频率响应,此时的送端系统频率特性最差,最低频率达到49.27 Hz,最大频率变化率绝对值 $|R|$ 达到了1.09 Hz/s。在此扰动下,系统的频率偏差和频率变化率分别超过了FTP控制器设定的动作值 F_{act} 、 R_{act} 。故此时FTP触发信号为1,FTP模块根据设定参数生成参考频率轨迹。当系统频率指标超过 F_{ip} 、 R_{ip} 时,开关S动作,控制系统从下垂控制切换为FTP控制,高压直流输电根据参考频率轨迹对送端电网频率进行定向调节,使系统频率轨迹在满足系统约束和直流出力限幅约束的前提下,尽可能地逼近参考频率轨迹,从而实现频率的最优控制。

从图6和表G2可以看出,FTP控制具有最优的频率响应特性,相比于高压直流输电不参与调频,FTP控制、虚拟惯性控制、下垂控制的最低频率分别提升了0.27、0.15、0.05 Hz。在稳态频率方面,虚拟惯性控制和直流不参与时较为接近,而采用FTP控制策略的稳态频率要优于下垂控制。并且从图6中的频率曲线可以看出,FTP控制对于风电参与调频引起的频率二次跌落具有较为显著的抑制作用。由图6和图G3可知,扰动发生后,FTP控制和虚拟惯性控制能够较好地抑制系统频率变化率,在调整直流系统进行有功调制时可以更好地跟随系统的频率变化率,提供更多的惯性支撑,其中FTP控制的性能较优,从而表明采用本文所提策略能够更好地利用直流系统的频率调节能力,在抑制频率二次跌落的同时,保证送端系统的频率稳定性。

3.3 直流系统自适应调频控制对受端电网的影响分析

高压直流输电在利用直流输电功率参与送端系统调频的同时,会给受端系统带来新的功率扰动,从而影响受端系统的频率特性,因此有必要进一步分析高压直流输电参与送端系统调频控制对受端系统的影响。

在送端系统小功率负荷扰动情况下,本文所提FTP控制策略未启用,且送端系统处于频率稳定区,直流参与度较低,对受端系统的影响较小。因此,本文主要针对大功率阶跃扰动场景下受端系统的频率响应情况进行分析,在送端系统200 MW大功率阶跃负荷扰动情况下,受端系统的频率和频率变化率分别如附录G图G4和图G5所示。

从图G4、G5可以看出,相比于高压直流输电不参与送端调频,不同控制策略均对受端系统的频率特性产生了一定影响,其中FTP控制和虚拟惯性控制策略影响较为明显,最大频率偏差分别为0.18 Hz和0.17 Hz,最大频率变化率分别为0.21 Hz/s和0.2 Hz/s,均在本文所定义的送端系统频率稳定区内。对比图6和表G2可知,相对于高压直流输电不参与调频,送端系统最低频率改善了0.27 Hz,因此,

本文所提策略对受端系统的频率稳定影响较小,但对送端系统频率带来较大改善。高压直流输电参与送端调频对受端系统的影响大小,与直流系统和受端系统的额定容量有关,直流系统与受端系统额定容量的比值越小,送端扰动对受端系统频率特性的影响就越小^[23]。

本文所提控制策略的目的是解决大规模风电接入送端系统带来的频率稳定问题,主要应用于高比例新能源接入的弱送端系统经高压直流外送到较强系统场景下。相对于高比例外送的弱送端系统,受端系统网架结构相对稳定,具有较为充足的备用容量,能够承受一定功率扰动。为尽可能减小高压直流输电参与送端调频给受端系统带来的影响,本文所提策略对直流功率的可调容量进行了限幅,保证直流系统和受端系统的波动在允许范围内,通过调整限幅参数的大小,可以调整高压直流输电的调频参与度,从而减小对受端系统频率特性的影响,在实现异步互联电网频率支援的同时保证受端系统的频率稳定。

4 结论

本文主要针对含规模化风电接入的直流异步送端电网中的频率稳定问题,提出了一种基于FTP的异步联网直流自适应调频控制策略,有效提高了系统的频率稳定性,具体结论如下:

- 1)大规模风电接入直流异步送端电网会显著减少系统的惯性,降低送端系统的调频能力,利用直流FTP控制对功率的快速调节能力可以显著改善系统的一次调频性能,抑制频率二次跌落;
- 2)仿真对比分析表明直流频率调制采用下垂控制和虚拟惯性控制均能有效提升系统频率调节性能,但虚拟惯性控制对初始频率变化率的抑制效果更为显著;
- 3)本文所提FTP控制策略以频率指标为导向,直接根据频率偏差和频率变化率实现高压直流输电频率控制,简化了控制流程,在发生较大的负荷扰动时能够及时为系统提供合适的频率支撑,改善系统的频率响应特性,为直流频率调制在新型电力系统中的应用提供了参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱丽萍,刘文颖,邵冲,等.基于调相机与SVC协调的抑制高压直流送端风机脱网的控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(6):107-115.
- ZHU Liping, LIU Wenyong, SHAO Chong, et al. Control strategy of suppressing wind turbine tripping based on coordination between synchronous condenser and SVC in sending-end network of HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 107-115.

- [2] 曾雪洋,张纯,王顺亮,等. 基于卸载系数变化的风电机组一次调频控制[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):119-125,139.
ZENG Xueyang,ZHANG Chun,WANG Shunliang, et al. Primary frequency control of wind turbine based on deloading coefficient variation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(8):119-125,139.
- [3] 刘福锁,卿梦琪,唐飞,等. 计及风电一次调频和频率约束的风电占比极限值计算[J]. 电网技术,2021,45(3):863-870.
LIU Fusuo,QING Mengqi,TANG Fei, et al. Limit proportion calculation of wind power considering primary frequency modulation and frequency constraints[J]. Power System Technology, 2021,45(3):863-870.
- [4] ATTYA A B,DOMINGUEZ-GARCIA J L,ANAYA-LARA O. A review on frequency support provision by wind power plants: current and future challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,81:2071-2087.
- [5] 刘洪波,彭晓宇,张崇,等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):81-92.
LIU Hongbo,PENG Xiaoyu,ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(11):81-92.
- [6] 王素娥,吴永斌,熊连松,等. 光伏并网发电系统的虚拟惯量控制策略[J]. 高电压技术,2020,46(11):3743-3751.
WANG Su'e,WU Yongbin,XIONG Liansong, et al. Virtual inertia control strategy for grid-tied photovoltaic power generation system[J]. High Voltage Engineering,2020,46(11):3743-3751.
- [7] 周海强,鲁锦文,薛峰,等. 计及风电综合惯性控制的电力系统扩展频率响应模型[J]. 电力系统自动化,2023,47(8):198-205.
ZHOU Haiqiang,LU Jinwen,XUE Feng, et al. Extended frequency response model for power system considering wind power synthetic inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(8):198-205.
- [8] GOWAID I A,EL-ZAWAWI A,EL-GAMMAL M. Improved inertia and frequency support from grid-connected DFIG wind farms[C]//2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Phoenix,AZ,USA:IEEE,2011:1-9.
- [9] ZHONG Q C,WEISS G. Synchronverters:inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(4):1259-1267.
- [10] 马铨林,杨欢,屈子森,等. 改善虚拟同步发电机阻尼特性的设计方法[J]. 电网技术,2021,45(1):269-275.
MA Yilin,YANG Huan,QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator[J]. Power System Technology,2021,45(1):269-275.
- [11] 陈长青,李欣然,谭庄熙. 考虑风电不确定性的风储调频能力[J]. 高电压技术,2022,48(6):2128-2139.
CHEN Changqing,LI Xinran,TAN Zhuangxi. Frequency modulation capability of wind storage considering wind power uncertainty[J]. High Voltage Engineering,2022,48(6):2128-2139.
- [12] 朱瑛,秦立宽,颜全椿,等. 考虑频率响应过程的风储联合调频策略及储能系统优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):28-35.
ZHU Ying,QIN Likuan,YAN Quanchun, et al. Wind-storage combined frequency regulation strategy and optimal configuration method of energy storage system considering process of frequency response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(10):28-35.
- [13] 王华伟,韩民晓,范园园,等. 呼辽直流孤岛运行方式下送端系统频率特性及控制策略[J]. 电网技术,2013,37(5):1401-1406.
WANG Huawei,HAN Minxiao,FAN Yuanyuan, et al. Sending end frequency characteristics under islanded operation mode of HVDC transmission system from Hulun Buir to Liaoning and corresponding control strategy[J]. Power System Technology,2013,37(5):1401-1406.
- [14] 艾青,刘天琪,印月,等. 含大规模风电的高压直流送端系统多源协同调频策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):56-63.
AI Qing,LIU Tianqi,YIN Yue, et al. Multi-source coordinated frequency regulation strategy for HVDC sending system with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(10):56-63.
- [15] 邹朋,王渝红,李兴源,等. 适合风电接入的直流输电辅助频率控制策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5750-5756,6017.
ZOU Peng,WANG Yuhong,LI Xingyuan, et al. Frequency control strategy for HVDC power system with wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5750-5756,6017.
- [16] 王华伟,韩民晓,雷霄,等. 火电机组直流孤岛系统频率控制分析与系统试验[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):139-148.
WANG Huawei,HAN Minxiao,LEI Xiao, et al. Frequency control analysis and system commissioning for thermal generation with HVDC islanded operation[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):139-148.
- [17] 王泽昊,汪娟娟,刘岳坤,等. 考虑频率耦合效应的柔性直流输电高频谐振抑制措施[J]. 电力系统自动化,2023,47(10):164-173.
WANG Zehao,WANG Juanjuan,LIU Yuekun, et al. High-frequency resonance suppression measure for MMC-HVDC considering frequency coupling effect[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(10):164-173.
- [18] 邵克强,王渝红,史华勃,等. 区域间异步联网直流参与辅助调频服务策略研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(22):7249-7259.
TAI Keqiang,WANG Yuhong,SHI Huabo, et al. Research on strategy of HVDC participating in frequency regulation ancillary service in asynchronous interconnection power grids[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(22):7249-7259.
- [19] XIONG L S,LIU L,LIU X K, et al. Frequency trajectory planning based strategy for improving frequency stability of droop-controlled inverter based standalone power systems[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,2021,11(1):176-187.
- [20] TAMRAKAR U,SHRESTHA D,MAHARJAN M, et al. Virtual inertia:current trends and future directions[J]. Applied Sciences,2017,7(7):654.
- [21] 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):3498-3506.
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):3498-3506.
- [22] 颜湘武,王德胜,杨琳琳,等. 直驱风机惯量支撑与一次调频协调控制策略[J]. 电工技术学报,2021,36(15):3282-3292.
YAN Xiangwu,WANG Desheng,YANG Linlin, et al. Coordinated control strategy of inertia support and primary frequency regulation of PMSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(15):3282-3292.
- [23] 侍乔明,郭铭群,刘凯,等. 考虑惯性响应的特高压直流频率协调控制[J]. 电网技术,2021,45(9):3432-3442.
SHI Qiaoming,GUO Mingqun,LIU Kai, et al. Coordinated frequency control for UHVDC considering inertia response[J]. Power System Technology,2021,45(9):3432-3442.

- [24] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 799-817.

作者简介:

王渝红(1971—),女,教授,博士研究生导师,主要研究方向为高压直流输电(**E-mail**:yuhongwang@scu.edu.cn);

赏成波(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统频率稳定、高压直流输电(**E-mail**:1782635375@qq.com);

廖建权(1994—),男,副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为直流输电故障分析及控制(**E-mail**:jqianliao@scu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Adaptive frequency modulation control strategy for asynchronous connected HVDC transmission system adapted to wind power access

WANG Yuhong, SHANG Chengbo, LIAO Jianquan, ZHU Lingli, LI Yuanqi, ZHU Yan

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The large-scale wind power connection to the high voltage direct current (HVDC) sending-end system leads to the reduction of system inertia and the lack of frequency modulation capacity of the sending-end system. In order to fully tap the potential of cooperative frequency modulation of HVDC and wind power and improve the frequency modulation performance of HVDC sending-end system with wind power, an adaptive frequency modulation control strategy for asynchronous connected HVDC transmission system based on frequency trajectory planning is proposed. The frequency control characteristics of the HVDC transmission system with wind power are analyzed. The active frequency support of wind power and DC auxiliary frequency control are comprehensively considered, and the reference frequency trajectory is generated by taking the frequency deviation and frequency change rate as the quantitative index. On this basis, by dividing the frequency trajectory into regions and taking the reference frequency trajectory as the benchmark, the adaptive adjustment of HVDC transmission to the sending-end system frequency is realized. Based on the MATLAB/Simulink platform, an improved two-area four-machine model is built for simulation analysis to verify the effectiveness and superiority of the proposed strategy.

Key words: HVDC power transmission; wind power frequency modulation; frequency trajectory planning; primary frequency modulation; asynchronous power grid

附录 A

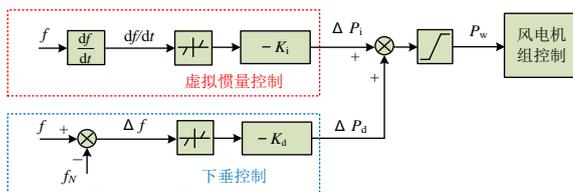


图 A1 风电机组频率虚拟惯量控制和下垂控制

Fig.A1 Wind turbine frequency virtual inertia control and droop control

图中： f 、 f_N 分别为系统实时频率和额定频率； K_i 、 K_d 分别为虚拟惯量控制系数和下垂系数； ΔP_i 、 ΔP_d 分别为风电机组虚拟惯性控制和下垂控制功率变化参考值， ΔP_w 为两者之和。

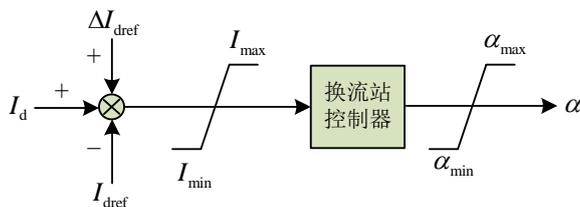


图 A2 直流系统功率控制逻辑

Fig.A2 DC system power control logic

图中： I_d 为直流电流实测值； I_{dref} 、 ΔI_{dref} 分别为直流电流参考值和参考变化量； I_{max} 、 I_{min} 和 α_{max} 、 α_{min} 分别为电流限幅和触发角限幅； α 为控制器输出的触发角指令。

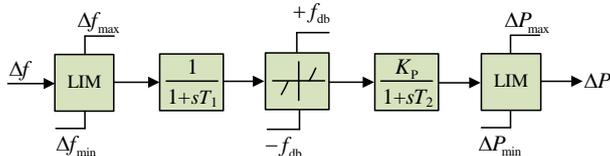


图 A3 基于下垂控制的频率控制器框图

Fig.A3 Frequency controller block diagram based on droop control

图中： Δf 为系统频差； Δf_{max} 、 Δf_{min} 为频差输入限幅； T_1 、 T_2 为滤波时间常数； $+f_{db}$ 、 $-f_{db}$ 为系统调节死区； ΔP_{max} 、 ΔP_{min} 分别为直流功率调节量上限和下限； K_p 、 ΔP 分别为比例系数和直流功率附加调节量。

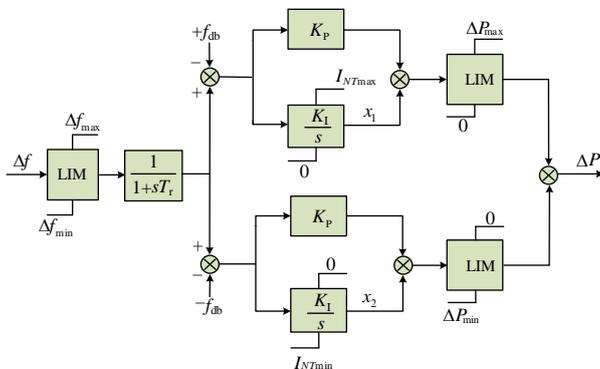


图 A4 基于 PI 控制的频率控制器框图

Fig.A4 Block diagram of frequency controller based on PI control

图中： T_r 、 K_i 分别为滤波时间常数和积分系数； I_{NTmin} 、 I_{NTmin} 为积分环节状态变量限幅； x_1 、 x_2 为

系统状态量；其余变量含义与图 A3 相同。

附录 B

异步送端系统扰动后的频率表达式可以表示为：

$$f = f_0 - F(1 - e^{-\sigma t})\text{sign}(P_{\text{dis}}) \quad (\text{B1})$$

式中： P_{dis} 为负荷的扰动功率， $\text{sign}(x)$ 为符号函数，表达式如下：

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ -1 & x \leq 0 \end{cases} \quad (\text{B2})$$

扰动功率 P_{dis} 的符号可以和频率变化率的符号联系起来，当扰动功率为正时，系统有功不足，频率下降，则频率变化率为负，因此式(B1)可以转化为：

$$f = f_0 + F(1 - e^{-\sigma t})\text{sign}(R) \quad (\text{B3})$$

式中： R 为频率变化率。本文主要考虑频率偏差和频率变化率作为系统频率指标，则 2 个指标的一般表达式为：

$$\begin{cases} \Delta f = f_N - f = f_N - f_0 - F(1 - e^{-\sigma t})\text{sign}(R) \\ R = \frac{df}{dt} = \sigma F e^{-\sigma t} \text{sign}(R) \end{cases} \quad (\text{B4})$$

因此，频率指标绝对值的最大值为：

$$\begin{cases} |\Delta f|_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta f| = |f_N - f_0 - F\text{sign}(R)| \\ |R|_{\max} = \lim_{t \rightarrow 0} |R| = \sigma F \end{cases} \quad (\text{B5})$$

考虑到 f_0 和 f_N 以及 R 和 0 之间的相对关系， $|\Delta f|_{\max}$ 可以转化为：

$$|\Delta f|_{\max} = F - (f_N - f_0)\text{sign}(R) \quad (\text{B6})$$

根据频率安全稳定要求， $|\Delta f|_{\max}$ 和 $|R|_{\max}$ 应满足：

$$\begin{cases} |\Delta f|_{\max} \leq F_{\text{std}} \\ |R|_{\max} \leq R_{\text{std}} \end{cases} \quad (\text{B7})$$

式中： F_{std} 和 R_{std} 分别为电网导则指定的频率偏差和频率变化率继电器动作安全阈值。当 $|\Delta f|_{\max}$ 和 $|R|_{\max}$ 超过相关阈值时，将会触发保护装置动作从而发生低频减载或切机。结合式(B5)—式(B7)可以得出：

$$\begin{cases} F \leq F_{\text{cr}} = F_{\text{std}} + (f_N - f_0)\text{sign}(R) \\ \sigma \leq \sigma_{\text{cr}} = \frac{R_{\text{std}}}{F_{\text{cr}}} \end{cases} \quad (\text{B8})$$

式中： F_{cr} 和 σ_{cr} 分别为临界频率偏差和临界频率衰减率。代入式(B3)即可得出符合电网安全稳定要求的临界频率表达式为：

$$f = f_0 + F_{\text{cr}}(1 - e^{-\sigma_{\text{cr}} t})\text{sign}(R) \quad (\text{B9})$$

附录 C

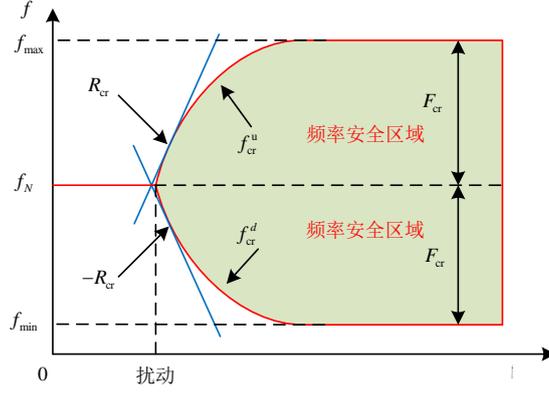


图 C1 临界频率轨迹和频率安全区域示意图

Fig.C1 Schematic diagram of critical frequency trajectory and frequency safe area

图中： F_{cr} 和 R_{cr} 分别为临界频率偏差和临界频率变化率， f_{cr}^d 、 f_{cr}^u 分别为发生正功率扰动和负功率扰动时的临界频率轨迹， f_{max} 和 f_{min} 分别为符合频率安全要求的最大频率和最小频率。

附录 D

结合式(4)，假设 FTP 控制模块在 t_0 时刻触发，则参考频率轨迹可以表示为：

$$f_{TP} = f_0 + F(1 - e^{-\sigma(t-t_0)})\text{sign}(R_0) \quad (D1)$$

式中： f_0 、 R_0 分别为 t_0 时刻系统的实际频率和频率变化率。在模块触发时刻， f_{TP} 与实际系统频率一致，频率变化率等于参考值 R_{tp} ，在稳态时， f_{TP} 的频率偏差应为参考值，故有：

$$\begin{cases} |R_{TP}|_{\max} = \lim_{t \rightarrow t_0} |R_{TP}| = \sigma F = R_{tp} \\ |\Delta f_{TP}|_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta f_{TP}| = |f_N - f_0 - F\text{sign}(R_0)| = F_{tp} \end{cases} \quad (D2)$$

结合式(B6)，可以将式(D2)简化为：

$$\begin{cases} F - (f_N - f_0)\text{sign}(R_0) = F_{tp} \\ \sigma F = R_{tp} \end{cases} \quad (D3)$$

进一步有：

$$\begin{cases} F = F_{tp} + (f_N - f_0)\text{sign}(R_0) \\ \sigma = \frac{R_{tp}}{F} = \frac{R_{tp}}{F_{tp} + (f_N - f_0)\text{sign}(R_0)} \end{cases} \quad (D4)$$

将式(D4)代入式(D1)，可求得参考频率轨迹为：

$$f_{TP} = \begin{cases} f_N + F_{tp} - (f_N - f_0 + F_{tp})e^{-\frac{R_{tp}}{F_{tp} + f_N - f_0}(t-t_0)} & \text{sign}(R_0) = 1 \\ f_N - F_{tp} - (f_N - f_0 - F_{tp})e^{-\frac{R_{tp}}{F_{tp} - f_N + f_0}(t-t_0)} & \text{sign}(R_0) = -1 \end{cases} \quad (D5)$$

对应的参考频率变化率轨迹为：

$$R_{TP} = \frac{df_{TP}}{dt} = R_{tp} e^{-\frac{R_{tp}}{F_{tp} + (f_N - f_0)\text{sign}(R_0)}(t-t_0)} \text{sign}(R_0) \quad (D6)$$

附录 E

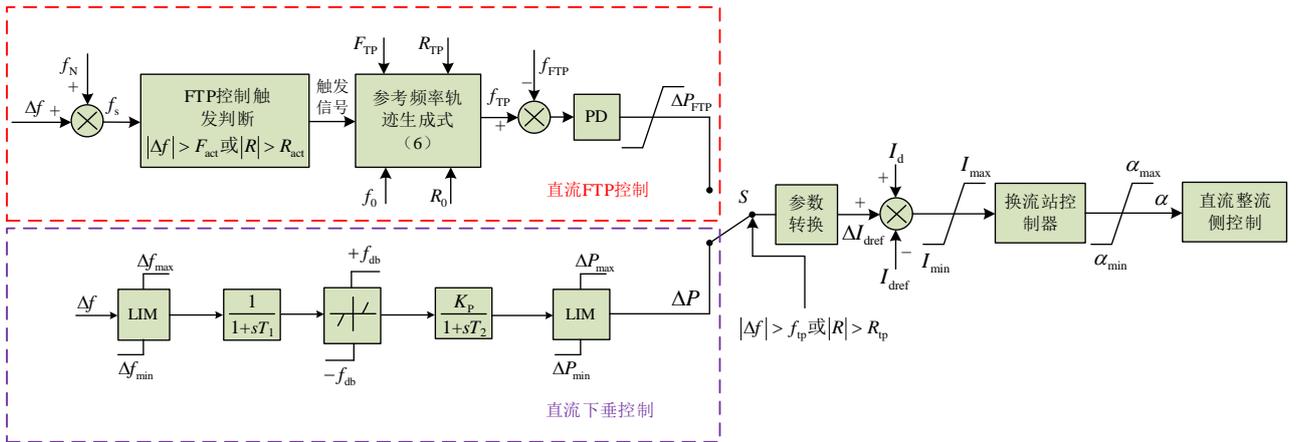


图 E1 基于 FTP 的直流调频控制策略

Fig.E1 DC frequency modulation control strategy based on FTP

图中： f_s 为系统频率； F_{act} 、 R_{act} 分别为 FTP 模块的触发阈值； ΔP_{FTP} 、 ΔP 分别为 FTP 控制和下垂控制的直流功率参考值。

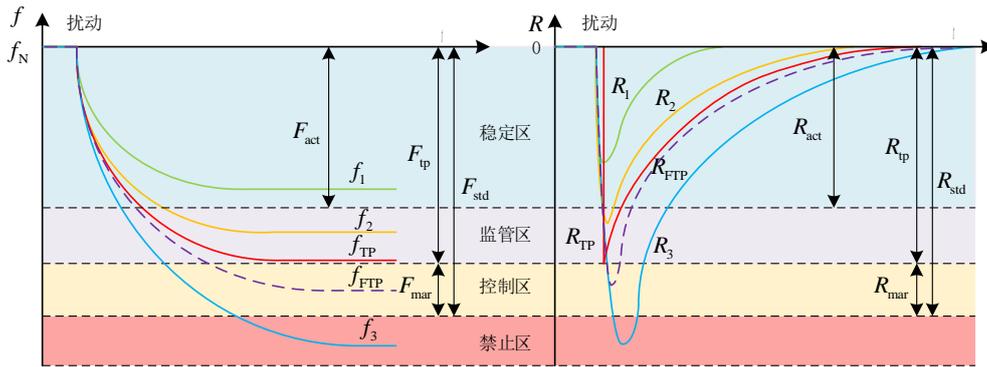


图 E2 频率轨迹区域划分

Fig.E2 Frequency trajectory region division

附录 F

根据图 E1 所示的控制策略，当 FTP 控制触发时，直流调频功率的参考值 ΔP_{FTP} 由阻尼功率 P_{da} 和惯性功率 P_{in} 共同决定，满足：

$$\begin{aligned} \Delta P_{FTP} &= P_{da} + P_{in} = \\ &K_p (f_{TP} - f_{FTP}) + K_d (R_{TP} - R_{FTP}) \end{aligned} \quad (F1)$$

由图 E2 可知，当 $t \rightarrow \infty$ 时， f_{TP} 和 f_{FTP} 的差值具有最大值，当 $t \rightarrow t_0$ 时， R_{TP} 和 R_{FTP} 的差值具有最大值，则有：

$$\begin{cases} |P_{da}|_{\max} = K_p \lim_{t \rightarrow \infty} |f_{TP} - f_{FTP}| = \\ K_p \lim_{t \rightarrow \infty} |(f_N - f_{FTP}) - (f_N - f_{TP})| = \\ K_p \lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta f_{FTP} - \Delta f_{TP}| = \\ K_p (\lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta f_{FTP}| - \lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta f_{TP}|) \\ |P_{in}|_{\max} = K_d \lim_{t \rightarrow t_0} |R_{TP} - R_{FTP}| = K_d (\lim_{t \rightarrow t_0} |R_{FTP}| - \lim_{t \rightarrow t_0} |R_{TP}|) \end{cases} \quad (F2)$$

因为系统的最大频率偏差 Δf_{FTP} 和最大频率变化率 R_{FTP} 需保证系统不触发继电器保护装置动作，保证系统不发生切机减载，则：

$$\begin{cases} |\Delta f_{FTP}|_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta f_{FTP}| < F_{std} \\ |R_{FTP}|_{\max} = \lim_{t \rightarrow t_0} |R_{FTP}| < R_{std} \end{cases} \quad (F3)$$

又由式(5)、(D2)和(F2)可得：

$$\begin{cases} |P_{da}|_{\max} = K_p (\lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta f_{FTP}| - F_{std} + F_{mar}) \\ |P_{in}|_{\max} = K_d (\lim_{t \rightarrow t_0} |R_{FTP}| - R_{std} + R_{mar}) \end{cases} \quad (F4)$$

将式(F3)代入式(F4)可得：

$$\begin{cases} K_p > \frac{|P_{da}|_{\max}}{F_{mar}} \\ K_d > \frac{|P_{in}|_{\max}}{R_{mar}} \end{cases} \quad (F5)$$

由式(F1)可知， K_p 和 K_d 越大，则高压直流输电调频参考功率也越大，相应的附加惯性和阻尼效果就越强。但高压直流输电能够提供的调频功率有限，过大的参考功率可能会造成直流系统无法稳定运行，故需要在控制器输出中加入限幅环节，使 $-\Delta P_{FTP}|_{\max} \leq \Delta P_{FTP} \leq \Delta P_{FTP}|_{\max}$ ，则：

$$|K_p (f_{TP} - f_{FTP}) + K_d (R_{TP} - R_{FTP})| \leq \Delta P_{FTP}|_{\max} \quad (F6)$$

附录 G

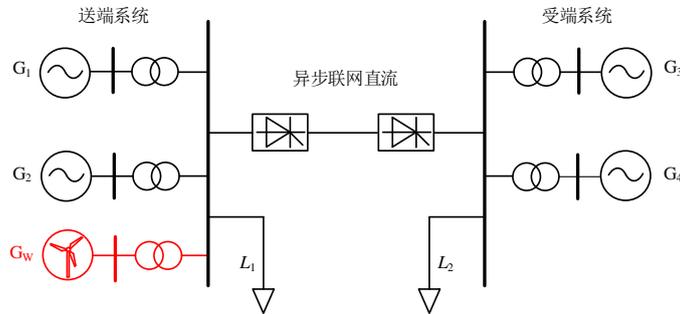


图 G1 改进两区域 4 机异步电网模型

Fig.G1 Improvement of 2-area 4-machine asynchronous power grid model

表 G1 FTP 仿真参数设置

Table G1 FTP simulation parameter settings

参数	参数值/Hz	参数	参数值/(Hz s ⁻¹)
----	--------	----	---------------------------

F_{act}	0.2	R_{act}	0.3
F_{tp}	0.3	R_{tp}	0.6
F_{std}	0.5	R_{std}	1.2
K_p	200	K_d	1000

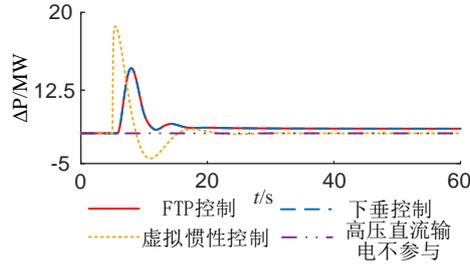


图 G2 小功率负荷扰动时直流系统有功调制量

Fig.G2 Active power modulation of DC system under low-power load disturbance

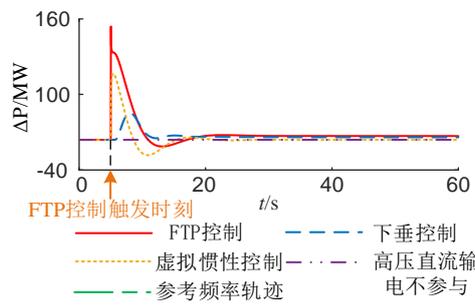


图 G3 大功率阶跃扰动时直流系统有功调制量

Fig.G3 Active power modulation of DC system under high power step disturbance

表 G2 不同控制策略下调频指标

Table G2 Frequency reduction index of different control strategies

控制策略	f_{min}/Hz	$\Delta f_{min}/\text{Hz}$	$\Delta f_{max}/\text{Hz}$	$\Delta f_{sta}/\text{Hz}$
直流不参与	49.27	0(基准值)	0.73	0.335
下垂控制	49.31	0.05	0.69	0.329
虚拟惯性控制	49.42	0.15	0.58	0.334
FTP 控制	49.54	0.27	0.46	0.326

注: f_{min} 为系统最低频率, Δf_{min} 为系统最低频率改善值, Δf_{max} 为最大频率偏差, Δf_{sta} 稳态频率偏差。

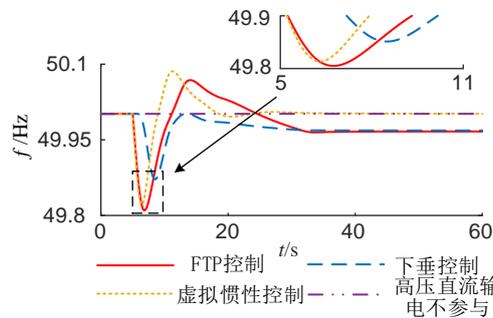


图 G4 大功率阶跃扰动时受端交流系统频率

Fig.G4 Frequency of receiving-side AC system under high power step disturbance

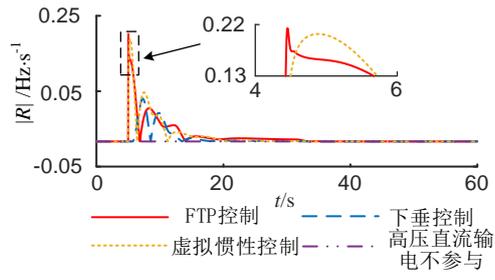


图 G5 大功率阶跃扰动时受端交流系统频率变化率

Fig.G5 Rate of change of frequency of receiving-side AC system under high power step disturbance