

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.010

基于柔性直流互联系统容量优化的自适应下垂控制

张秋玥, 王楚扬, 张犁

(河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:随着负荷日渐增加和新能源大量并网, 柔性直流互联系统被广泛应用于实际工程。基于下垂控制策略的柔性直流互联系统能按下垂特性实现系统功率和电压的自动调节, 但系统的传输容量受到换流站容量和电压质量要求的约束而难以充分利用。为此, 文中提出一种基于柔性直流互联系统容量优化的自适应下垂控制策略。该策略首先增加了下垂系数修正环, 在电压或功率即将越限时逐渐调节相应换流站的下垂系数, 在不过容或不越限的前提下增大传输功率。此外, 为了削弱下垂系数改变对原有控制造成的影响并优化系统能源消耗特性, 以系统对接源负荷潮流调整率最小、发电能源耗量最少为目标建立数学模型。通过非支配排序遗传算法(non-dominated sorting in genetic algorithm, NSGA-II)求解模型, 得出各换流站的最优修正梯度。最后, 使用 PLECS 搭建四端柔性直流互联模型, 仿真验证所提策略的有效性和可行性。

关键词:柔性直流互联系统; 下垂控制; 换流站容量; 电压质量; 传输容量; 最优修正梯度

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)04-0090-10

0 引言

新能源装机容量的不断增加对电力系统新能源消纳能力提出了更高的要求^[1-4], 同时与日俱增的受端负荷进一步增加了电力系统的功率负担^[5]。在新能源大量并网和用电负荷不断攀升的双重影响下, 新型电力系统传输容量亟须扩增。柔性直流(下文简称柔直)互联系统采用全控型绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor, IGBT), 能有效提升供电可靠性和新能源消纳水平, 被广泛应用于新能源并网、大容量输电^[6-12]。

充足的传输容量是柔直互联系统实现可靠供电、合理消纳新能源的必要前提。柔直互联系统常用控制策略为主从控制、电压裕度控制和下垂控制^[13]。基于下垂控制的柔直互联系统中, 各换流站通过本地电压、功率信息, 根据下垂特性优化调节系统传输功率, 无需换流站间的通信即可实现电压和功率的协调控制, 易于拓展、可靠性高, 适用于多换流站、功率波动频繁的柔直互联系统^[14-16]。然而, 传统下垂控制的下垂系数固定, 且在设定时未充分考虑各换流站不同容量和电压质量要求对系统传输容量的约束, 造成系统传输容量浪费和供电可靠性下降^[17-18]。因此, 如何在保证系统安全稳定运行的同时, 优化系统传输容量, 提升供电可靠性和新能源消纳水平是亟待解决的问题^[19-21]。

目前, 已有学者对基于下垂控制的柔直互联系

统传输容量约束和优化问题展开研究。文献[22-23]分析并优化了系统传输容量。其中, 文献[22]指出, 为保证柔直互联系统安全稳定运行, 避免功率过容和电压越限, 需要限制换流站的传输功率, 但功率限幅会导致系统传输容量下降, 系统的新能源消纳能力和供电可靠性降低; 文献[23]以功率扰动和电压波动最小为目标, 计算功率参考值, 优化系统功率传输特性, 但计算量过大, 难以及时计算并调整相关控制参数。文献[24-26]着眼于系统传输容量的提升, 对下垂系数进行自适应修正。其中, 文献[24]引入功率裕度因子, 根据实际工况实时修正下垂系数; 文献[25]利用本地电压偏差信息实时调整换流站的运行工作点, 避免相关参数越限; 文献[26]根据母线电压安全裕度, 动态调整下垂系数。以上自适应修正策略在一定程度上增加了系统的传输容量, 但由于过于频繁地改变下垂系数, 破坏了原有控制策略, 导致控制策略复杂化、可靠性降低, 且调整控制参数时未充分考虑不同负荷对供电可靠性的要求和电源的能源耗量特性, 难以实现资源的合理分配和利用。

为了在保证系统安全稳定运行的前提下, 合理优化系统传输容量, 提高系统供电可靠性和新能源消纳水平, 文中基于传统下垂控制策略, 考虑换流站容量约束、不同负荷对供电可靠性的要求以及不同电源的能源耗量特性, 提出一种基于柔直互联系统容量优化的自适应下垂控制。首先, 分析基于下垂控制的柔直互联系统中换流站容量限制和电压质量要求对传输容量的约束; 其次, 基于上述局限

收稿日期: 2024-06-12; 修回日期: 2024-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52007052)

性,提出一种优化系统容量的下垂控制策略,增加下垂系数修正环,在功率或电压将要越限时修正下垂系数,提升系统容量;然后,以系统安全运行为前提,建立源储荷潮流调整率最小、发电能源耗量最少的多目标优化模型,求解各换流站下垂系数的最优修正梯度;最后,使用 PLECS 搭建四端柔直互联系统仿真模型,仿真验证了所提策略能有效优化系统传输容量,提高系统供电可靠性和新能源消纳水平。

1 换流站的基本拓扑和模型

1.1 换流站基本结构

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)结构灵活,易于扩展,能在高电压水平下实现大功率能量转换,被广泛应用于柔直互联系统。三相 MMC 包含 6 个桥臂,各桥臂的子模块数和电抗器大小相同。MMC 及其半桥子模块(sub-module, SM)的主电路结构如图 1 所示。

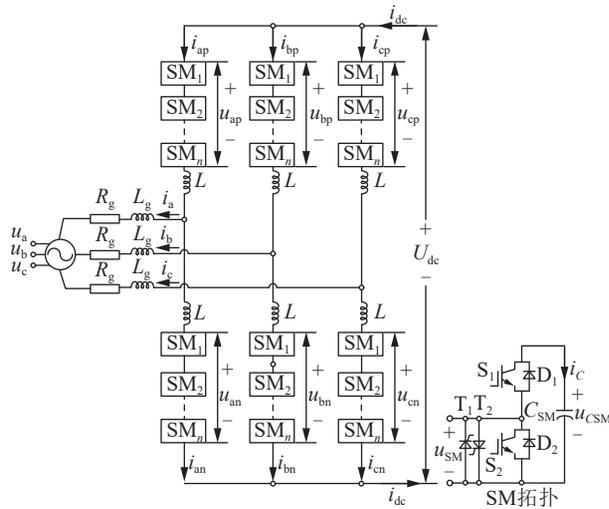


图 1 MMC 主电路及其半桥 SM 拓扑

Fig.1 Main circuit of the MMC and the half-bridge SM topology

图 1 中, i_{jp} 、 i_{jn} 分别为 j 相上、下桥臂电流, $j = a, b, c$; u_{jp} 、 u_{jn} 分别为 j 相上、下桥臂电压; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 a、b、c 相交流电流; u_a 、 u_b 、 u_c 分别为 a、b、c 相电压; U_{dc} 、 i_{dc} 分别为直流电压、直流电流; L 为桥臂电感; R_g 和 L_g 构成联络阻抗; T_1 、 T_2 为双向晶闸管,用以实现快速旁路功能; S_1 、 S_2 为 IGBT; D_1 、 D_2 为二极管; C_{SM} 为电容; i_C 、 u_{CSM} 分别为 SM 电容电流和电压; u_{SM} 为 SM 输出电压。

1.2 MMC 半桥 SM 数学模型

MMC 桥臂电流包含电网基频分量、不平衡电流和直流电流。其中,直流电流和不平衡电流在桥

臂电感和环流控制器的作用下可忽略不计, MMC 单相电路结构可等效为图 2, 其中 i_{acir} 为 A 相不平衡电流。

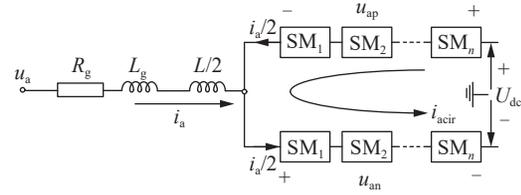


图 2 单相桥臂等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of single-phase bridge arm

根据基尔霍夫电压定律(Kirchhoff voltage law, KVL), A 相交流侧上、下桥臂间的电压 u_{grid_a} 可表示为:

$$\begin{aligned} u_{grid_a} &= R_g i_a + \left(L_g + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{ap}}{dt} - u_{ap} + \frac{U_{dc}}{2} = \\ R_g i_a + \left(L_g + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{an}}{dt} + u_{an} - \frac{U_{dc}}{2} = \\ R_g i_a + \left(L_g + \frac{L}{2} \right) \frac{di_a}{dt} + \frac{u_{an} - u_{ap}}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

令 I_{fl} 为基频交流电流的幅值, ω 、 φ 分别为角频率和初相位, 则 MMC 桥臂电流方程为:

$$\begin{cases} u_{ap} + u_{an} + 2L \frac{di_{acir}}{dt} = U_{dc} \\ i_{ap} = I_{fl} \sin(\omega t + \varphi) + i_{acir} + \frac{i_{dc}}{3} \\ i_{an} = I_{fl} \sin(\omega t + \varphi) + i_{acir} - \frac{i_{dc}}{3} \end{cases} \quad (2)$$

2 计及系统传输容量的改进下垂控制策略

2.1 基于下垂控制策略的柔直互联系统运行模式

图 3 为柔直互联系统示意, 其中 MMC_i 、 AC_i 分别表示柔直互联系统的第 i 个换流站及其连接的交流系统, $i = 1, 2, 3, 4$ 。

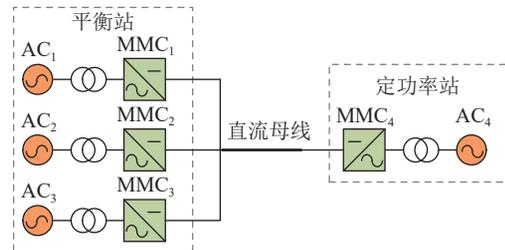


图 3 柔直互联系统示意

Fig.3 Schematic diagram of the flexible DC interconnection system

图 3 中, MMC_4 所连接的源储荷功率可调裕度较小, 通常运行在定功率控制模式; MMC_1 、 MMC_2 、 MMC_3 连接有较大调节裕度的源储荷, 被设定在下垂控制模式, 根据功率需求和母线电压共同协调控制系统传输功率和电压。

定功率控制作为最基本的运行模式,换流站有功参考值 P_{ref} 、无功参考值 Q_{ref} 由控制系统直接给定。此处设电压功角为 Φ , 交流电流和环流在 d 、 q 轴上的基准值 i_{sd_ref} 、 i_{zd_ref} 和 i_{sq_ref} 、 i_{zq_ref} 可表示为:

$$\begin{cases} \Phi = \tanh(Q_{ref}/P_{ref}) \\ i_{sd_ref} = 2P_{ref}/(3U_{sd} \cos(\tanh(\Phi))) \\ i_{zd_ref} = 0 \\ i_{sq_ref} = 2Q_{ref}/(3U_{sd} \sin(\tanh(\Phi))) \\ i_{zq_ref} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{sd} 为 d 轴交流电压基准值。

定功率控制结构如图 4 所示。其中, u_{1sd} 、 u_{2sq} 分别为比例积分 (proportional integral, PI) 调节器输出的 d 、 q 轴电压中间值; u_{diff_d} 、 u_{diff_q} 分别为 d 、 q 轴电压偏差值; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为 d 、 q 轴交流电流值; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为 d 、 q 轴交流电压值。

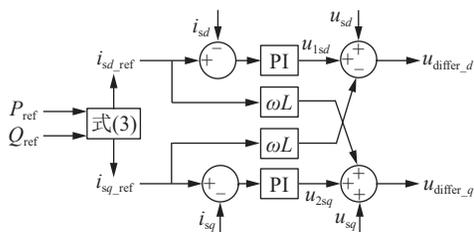


图 4 换流站的定功率控制结构
Fig.4 Constant power control structure of converter station

下垂控制策略由内而外包含 3 个控制环,即电流内环、功率环和电压下垂环,能实现柔直互联系统功率和电压的协调控制。控制简化结构如图 5 所示。

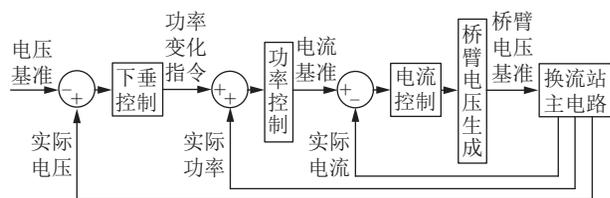


图 5 MMC 的下垂控制简化结构
Fig.5 Sagging control simplified structure of MMC

根据本地电压信息,换流站通过下垂特性曲线优化调节系统的传输功率和电压。下垂环中功率和电压的关系可表示为:

$$\Delta P_{ref} = K_{droop} \Delta U_{dc} = K_{droop} (U_{dc} - U_{dc_ref}) \quad (4)$$

式中: ΔP_{ref} 为功率变化指令; K_{droop} 为换流站下垂系数,运行过程中固定不变; U_{dc_ref} 为母线电压基准值; ΔU_{dc} 为电压偏差值。将 ΔP_{ref} 和换流站实际功率 P 输入功率环,得到电流信号 i_{sd_ref} 、 i_{sq_ref} , 作用于电流内环,形成三环控制,实现各换流站对系统

功率和电压的协调控制。传统下垂控制结构如图 6 所示。

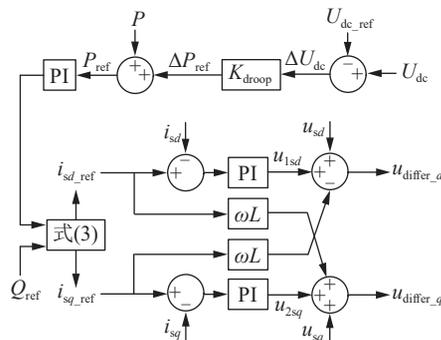


图 6 换流站的下垂控制结构

Fig.6 Sagging control structure of converter station

2.2 传统下垂控制策略的局限性

实际柔直互联系统中,不同换流站可传输的最大功率容量不同。为了保证柔直互联系统的安全运行,需要考虑不同换流站的容量,约束系统的传输容量。此外,柔直互联系统运行电压较高,电压质量要求更为严苛,在运行中母线电压偏差不可超过额定值的 $\pm 5\%$ 。面对各换流站的容量限制和电压质量要求的多重约束,传统下垂控制策略因固定的下垂系数,难以在满足各类约束的同时充分利用系统的传输容量。以四端柔直互联系统为例,设 MMC₁、MMC₂ 对接大量发电机组和部分储能、负荷; MMC₃ 对接大量抽蓄站,可根据系统运行情况馈出或馈入功率; MMC₄ 主要对接用电负荷。为简化分析,设可调功率裕度较大的 MMC₁、MMC₂ 和 MMC₃ 运行于下垂模式, MMC₄ 运行于定功率模式。文中功率以馈出系统为正。根据前文所述,得出各换流站的工作特性曲线,如图 7 所示。

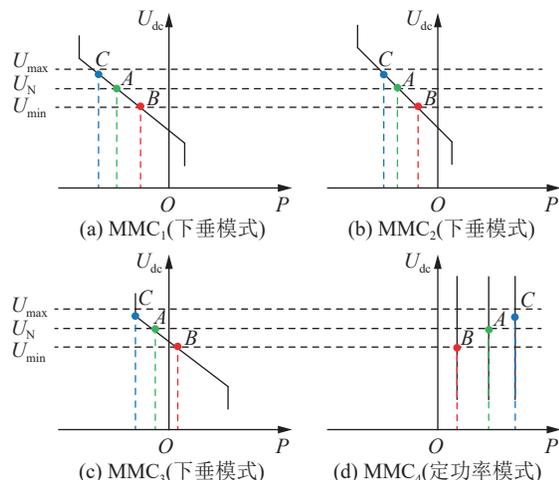


图 7 四端柔直互联系统工作特性曲线

Fig.7 Operating characteristic curves of four-terminal flexible DC interconnection system

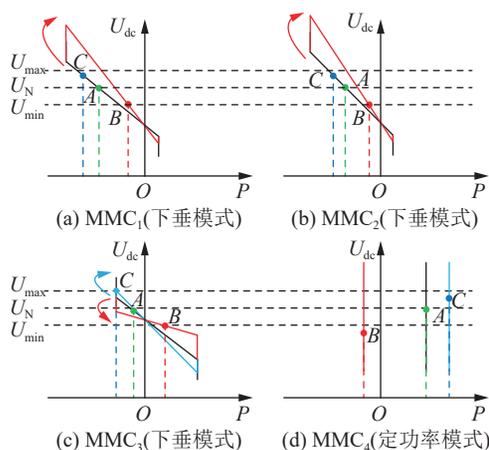


图9 增加下垂系数修正环后各换流站工作特性曲线
Fig.9 Operating characteristic curves of converter stations with the sagging coefficient correction loop

电低谷期,导致功率需求降低,运行点由A变为B,则系统母线电压降低至电压质量要求的最小值,电压参考值 U_{dc_ref} 有越限风险。此时,下垂系数修正环会根据修正梯度按比例改变各换流站的下垂特性,实现系统能在电压不越限的前提下,继续调控传输功率。若柔直互联系统因新能源出力减小或到达用电高峰期,导致系统功率需求增加,运行点逐渐增加到C,则MMC₃的传输功率已达所规定的安全传输功率裕度,其传输功率参考值有过容风险。此时,下垂系数修正环将根据修正梯度按比例改变MMC₃的下垂特性,使系统能在换流站不过容的前提下,继续调控传输功率和母线电压。

增加下垂系数修正环后,控制系统能根据各换流站功率过容、母线电压越限的情况及时调整下垂系数。当换流站功率指令达到容量上限或母线电压达到极值时,通过修正环不断调整下垂系数,直到换流站恢复功率指令下降且母线电压降低后,停止相应换流站下垂系数的修正,保持当前下垂系数继续运行。下垂系数修正环能在保证系统安全稳定运行的前提下,实现柔直互联系统传输容量的优化,增加系统供电可靠性和新能源消纳水平。

2.4 基于多目标的最优下垂修正梯度

下垂系数的大幅度频繁改变,必将破坏原有下垂控制策略的稳定性和可靠性。为了避免下垂系数的频繁变化,仅在相关参数即将越限时修正下垂系数。此外,为进一步削弱下垂系数修正对原有控制策略的影响,需要合理设置下垂系数修正梯度 α ,避免修正时下垂系数变化幅值过大。下垂系数修正后,每当母线电压单位变化 ΔU ,MMC_i功率增发量 ΔP_i 为:

$$\begin{cases} \Delta U = 1 \\ \Delta P_i = -\Delta U \alpha_i K_{i_droop} = -\alpha_i K_{i_droop} \end{cases} \quad (7)$$

式中: α_i 为MMC_i下垂系数修正梯度; K_{i_droop} 为MMC_i下垂系数。

为了减小系统整体功率调整率,使可调容量大的换流站承担更多功率调节,设置更大的下垂系数修正梯度。以下垂系数修正后,直流母线电压单位变化下,各换流站源储荷的功率变化占各自容量之比的总和最小为目标建立目标函数 f_1 。

$$\begin{aligned} \min f_1 &= \min \sum_{i=1}^N \frac{\Delta P_i}{\gamma(P_{i_max} - P_{i_min})} = \\ &= \min \sum_{i=1}^N \frac{-\alpha_i K_{i_droop}}{\gamma S_i} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: N 为运行于下垂模式的换流站总数; S_i 为MMC_i的功率容量。

考虑到各换流站对接机组的能源耗量特性不同,设MMC_i对接机组的耗量微增率为 λ_i ,表示单位时间内机组消耗的能源微增量与输出功率微增量的比值。单位时间内MMC_i消耗的能源 F_i 可通过式(9)计算。

$$F_i = -P_i \lambda_i \quad (9)$$

在满足一定约束条件的前提下,换流站功率分配时应考虑换流站所对接机组的能源耗量,尽可能减少系统能源消耗。设置目标函数 f_2 ,使下垂系数修正后的MMC_i单位时间内消耗能源变化量 ΔF_i 总和最小。

$$\begin{cases} \Delta F_i = -\lambda_i \Delta P_i = -\lambda_i \alpha_i K_{i_droop} \\ \min f_2 = \min \sum_{i=1}^N \Delta F_i = \min \sum_{i=1}^N -\lambda_i \alpha_i K_{i_droop} \end{cases} \quad (10)$$

当负荷攀升导致受端换流站功率需求增加,或气候原因导致送端换流站对接的新能源机组功率馈入减少时,系统无法提供足够功率支撑,导致受端换流站对接的配电网不得不切除部分负荷。此时,应先切除优先级较低的负荷,以保证重要负荷的稳定供电。文中研究聚焦于输电层面,对上述配电网层面的切负荷操作简化分析。根据重要性和经济性,参考文献[27],将受端换流站对接的负荷节点分为3个等级:一级负荷节点连接医院、党政军机关等重要负荷,设置权重系数 q_1 为6,设单位切负荷成本 c_1 为1000元/(kW·h);二级负荷节点连接学校、机关企业等较重要负荷,设置权重系数 q_2 为2,设单位切负荷成本 c_2 为200元/(kW·h);三级负荷节点连接非重要分散居民区等非重要负荷,设置权重系数 q_3 为1,设单位切负荷成本 c_3 为

50元/(kW·h)。设置目标函数 f_3 ,使切负荷造成的经济损失最小。

$$\begin{cases} C_{i_Loss} = \sum_{k=1}^3 c_k P_{k_Lack} \\ \min f_3 = \min \sum_{k=1}^3 q_k C_{i_Loss} \end{cases} \quad (11)$$

式中: C_{i_Loss} 为单位时间内受端换流站 i 切负荷的损失; P_{k_Lack} 为 k 级负荷节点的功率缺额。

此外,为了保证柔直互联系统的安全稳定运行,对换流站的功率和电压加以约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_i = 0 \\ \gamma P_{i_min} \leq P_i \leq \gamma P_{i_max} \\ U_{dc_min} \leq U_{dc} \leq U_{dc_max} \end{cases} \quad (12)$$

联立式(8)、式(10)一式(12),得到以系统整体功率改变率最小、整体发电能源消耗量最小和切负荷情况下造成的经济损失最小为目标,求解各换流站最优修正梯度的多目标优化数学模型。文中所提策略先通过已采用传统下垂控制策略投运的柔直互联系统的相关运行数据,计算适用于该系统各换流站的下垂系数修正梯度。然后,在传统下垂控制环路中加入下垂系数修正环,对传统策略进行改进。文中使用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting in genetic algorithm, NSGA-II)求解模型,具体步骤见图10。

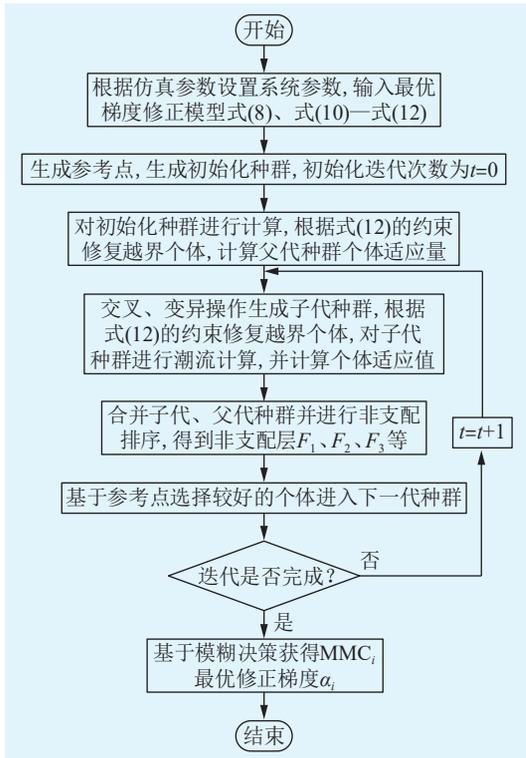


图10 基于NSGA-II的最优修正梯度计算

Fig.10 Modified gradient calculation based on NSGA-II

通过改进下垂控制策略,系统能在换流站功率即将过容或母线电压即将越限时,根据预设的修正梯度 α_i ,及时且平滑地修正相应换流站的下垂系数。文中所提策略能够优化系统传输容量、减少系统发电能源消耗量、提高系统供电可靠性。

3 仿真分析

为验证文中所提策略的可行性和有效性,参考张北柔直互联工程(简称张北工程)的四端环形拓扑^[28-30],在多功能电气仿真软件PLECS中搭建四端三相MMC的柔直互联系统仿真模型,如图11所示。为简化分析,设定换流站A、B、C对接大量功率可调的源储设备,运行于下垂控制模式,共同协调控制系统功率和电压;换流站D对接大量负荷,运行于定功率模式,负责给予用电负荷稳定的功率支撑。直流侧电压额定值 $U_{dc} = 500$ kV,母线电压允许波动范围为 $\pm 95\%U_{dc}$,其他仿真参数见表1。根据直流电压最大允许波动 $10\%U_{dc}$ 和最大下垂系数 K_{droop_c} ,设置换流站的功率裕度系数 γ ,为简化分析,文中 γ 均为97%。额定工况下,运行在下垂控制模式的送端换流站A、B、C分别向系统馈入功率475.2、594.1、930.7 MW,运行在定功率模式的换流站D从系统馈出功率2 000 MW。

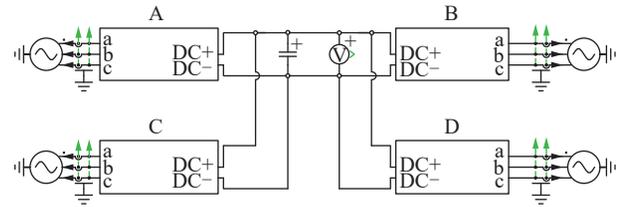


图11 柔直互联系统仿真模型

Fig.11 Simulation model of flexible interconnection system

3.1 算例1:换流站传输功率过容

0.05 s时,因进入用电高峰期,受端换流站D功率需求增长至2 800 MW,其他参数见表1。系统使用传统下垂控制策略和文中所提改进策略时,各换流站有功功率、母线电压以及下垂系数的变化波形如图12、图13所示。

图12中,0.05 s时,因为换流站D的功率需求突增至2 800 MW,换流站C馈入系统的有功功率首先到达其极值1 200 MW。达到功率极限后,换流站C转变为定功率模式,可以看作是其下垂系数突降至0。而换流站A和B继续按照预定的下垂系数分别向系统馈入功率711.1、888.9 MW。此时母线电压上升至510.1 kV,在允许波动范围内,系统功率平衡。但是换流站C由下垂模式切换至定功

表 1 相关设备仿真参数

Table 1 Simulation parameters of related equipment

参数名称	数值
换流站A有功容量 P_a /MW	1 200
换流站A对接机组耗量微增率 λ_a /[t·(MW·h) ⁻¹]	0.51
换流站A初始下垂系数 K_{droop_a}	24
换流站A下垂修正梯度 α_a	0.12
换流站B有功容量 P_b /MW	1 200
换流站B对接机组耗量微增率 λ_b /[t·(MW·h) ⁻¹]	0.34
换流站B初始下垂系数 K_{droop_b}	30
换流站B下垂修正梯度 α_b	0.26
换流站C有功容量 P_c /MW	1 200
换流站C对接机组耗量微增率 λ_c /[t·(MW·h) ⁻¹]	0.28
换流站C初始下垂系数 K_{droop_c}	47
换流站C下垂修正梯度 α_c	0.72
换流站D有功容量 P_d /MW	3 000

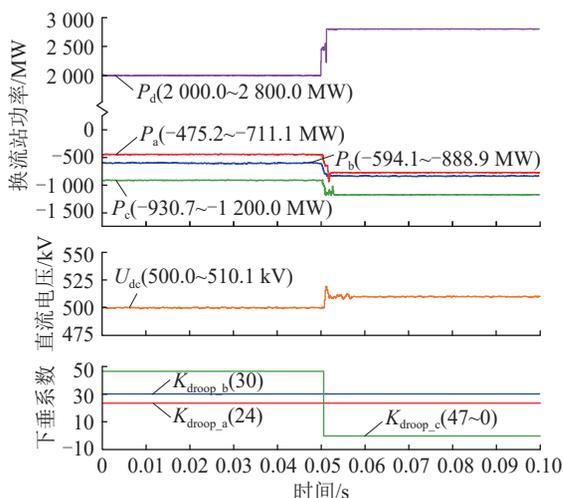


图 12 使用传统策略时系统的相关波形(算例 1)

Fig.12 The correlation waveforms based on the traditional strategy (case 1)

率运行模式,其控制环路的改变将破坏控制系统稳定性,引起系统功率、电压异常波动。

图 13 中,0.05 s 时,换流站 C 功率增加到文中所设的容量裕度($\gamma=97\%$)约束的最大值 1 164 MW 后,其下垂系数 K_{droop_c} 将按照修正梯度 α_c 不断调整。最后,换流站 C 下垂系数调整为 23.7,向系统馈入功率 1 164 MW,换流站 A、B 按原设下垂系数,分别向系统馈入功率 727.1、908.9 MW,换流站 D 从系统馈出功率 2 800 MW,保持对接负荷的供电需求。系统功率馈入、馈出平衡,母线电压上升至 510.5 kV,换流站始终保有功率调节裕度,运行在下垂模式,系统无异常波动。并且得益于合理的修正梯度,系统每小时消耗能源总量仅增加 4.88 t。

仿真对比表明,换流站功率需求达到上限时,

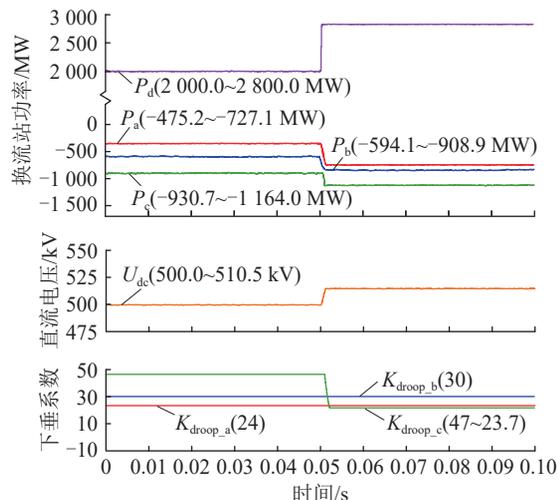


图 13 使用所提策略时系统的相关波形(算例 1)

Fig.13 The correlation waveforms based on the proposed strategy (case 1)

使用文中所提策略能及时修正下垂系数,使换流站始终保有一定的功率调节裕度,有效避免运行模式切换及其造成的电压、功率等异常波动。

3.2 算例 2: 母线电压越限

在算例 1 基础上,0.05 s 后,因新能源机组出力骤降,送端换流站 B 馈入功率降低至 500 MW,其他参数见表 1。系统使用传统下垂控制策略和文中所提改进策略时,各换流站有功功率、母线电压和下垂系数的变化波形如图 14、图 15 所示。

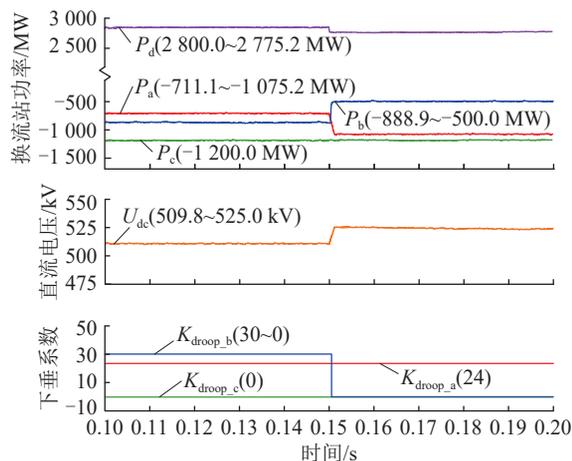


图 14 使用传统策略时系统的相关波形(算例 2)

Fig.14 The correlation waveforms based on the traditional strategy (case 2)

图 14 中,在算例 1 基础上,系统继续运行至 0.15 s 时,为了满足受端换流站 D 的功率需求,换流站 A 需要馈入更多功率。但当换流站 A 馈入功率增至 1 075.2 MW 时,系统母线电压也增加到上限 525 kV。为了避免电压越限,换流站 A 的功率不再增加,受端换流站 D 得不到足够功率支撑,功率缺额为 24.8 MW。理想情况下,功率缺额导致切

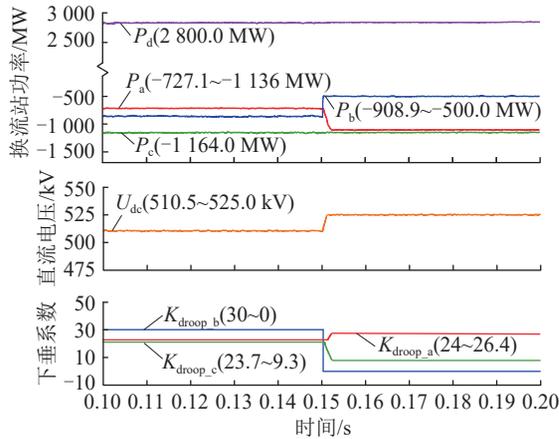


图 15 使用所提策略时系统的相关波形(算例 2)

Fig.15 The correlation waveforms based on the proposed strategy (case 2)

除的负荷均来自三级负荷节点,造成的经济损失为 1 237.6 元/h。

图 15 中,0.15 s 时,为平衡换流站 B 馈入功率降低造成的功率缺额,换流站 A 以原下垂系数不断加大馈入功率,而换流站 C 继续修正其下垂系数,保持向系统馈入功率 1 164 MW。当母线电压随功率增长而增加到极值 525 kV 时,换流站 A 也开始修正其下垂系数,直到向系统馈入功率 1 136 MW,系统实现功率平衡,此时换流站 A 和 C 的下垂系数分别被修正为 26.4、9.3。母线电压为 525 kV,每小时供电消耗能源总量增加 20.9 t,没有切负荷造成的经济损失。

4 结论

文中提出一种优化系统传输容量的下垂控制策略,仿真和分析表明:

(1) 在下垂控制环路中增加下垂系数修正环后,控制系统能在功率过容或电压越限时,调整相应下垂系数,避免换流站运行模式切换,在柔直互联系统安全稳定运行的前提下,优化系统传输容量,提升供电可靠性和新能源消纳水平。

(2) 以源储荷功率变化率最小、系统耗能和经济损失最少为目标,求解得到下垂系数最优修正梯度,能削弱下垂系数修正对原有下垂控制策略造成的影响并优化系统的能源耗量特性,提升策略的工程实用性。

致谢

本文得到中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210202064),中国博士后科学基金项目(2020M671315),江苏省输配电装备技术重点实验室课题(2021JSSPD08)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].*电力系统自动化*,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.未来配电系统形态及发展趋势[J].*中国电机工程学报*,2015,35(6):1289-1298.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [3] 员江洋,刘宁宁,杨明,等.山东电网新能源消纳关键措施分析及综合评估[J].*全球能源互联网*,2023,6(6):567-576.
YUN Jiangyang, LIU Ningning, YANG Ming, et al. Comprehensive assessment and analytics for renewable energy accommodation key factors of Shandong power grid[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2023, 6(6): 567-576.
- [4] 丁坤,陈博洋,秦建茹,等.大规模新能源集群接入弱电网的消纳能力评估方法[J].*电力建设*,2023,44(11):86-94.
DING Kun, CHEN Boyang, QIN Jianru, et al. Evaluation method of consumption ability of new large scale energy clusters connected to weak grids[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(11): 86-94.
- [5] KARIMIANFARD H, HAGHIGHAT H. Generic resource allocation in distribution grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 810-813.
- [6] PAMSHETTI V B, SINGH S, THAKUR A K, et al. Multistage coordination volt/var control with CVR in active distribution network in presence of inverter-based DG units and soft open points[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(3): 2035-2047.
- [7] 许洪强,姚建国,南贵林,等.未来电网调度控制系统应用功能的新特征[J].*电力系统自动化*,2018,42(1):1-7.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, NAN Guilin, et al. New features of application function for future dispatching and control systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 1-7.
- [8] 赵峥,李明,田园园,等.江苏如东海上风电柔直工程系统谐振分析与抑制[J].*电力建设*,2023,44(6):144-152.
ZHAO Zheng, LI Ming, TIAN Yuanyuan, et al. Resonance analysis and suppression in Jiangsu Rudong offshore wind power flexible DC system[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(6): 144-152.
- [9] 贾科,董学正,李俊涛,等.一种适用于海上风电经 MMC-MTDC 并网的电网侧故障穿越方法[J].*电力系统保护与控制*,2023,51(21):76-85.
JIA Ke, DONG Xuezheng, LI Juntao, et al. A grid-side fault ride-through method suitable for offshore wind farms connected with MMC-MTDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 76-85.

- [10] 彭忠, 黄海, 叶荣, 等. 远海风电柔性直流送端交流系统故障协调控制[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6): 628-639.
PENG Zhong, HUANG Hai, YE Rong, et al. Coordination control for sending end AC system fault of flexible DC transmission connected offshore wind power[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 628-639.
- [11] 文卫兵, 赵峥, 李明, 等. 海上风电柔性直流系统设计及工程应用[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1): 1-9.
WEN Weibing, ZHAO Zheng, LI Ming, et al. Design and engineering application of offshore wind power VSC-HVDC system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 1-9.
- [12] 程骁, 顾乔根, 任旭超, 等. 海上风电柔性直流输电换流变差动保护的适应性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 8-18.
CHENG Xiao, GU Qiaogen, REN Xuchao, et al. Adaptability analysis on differential protection of converter transformers in a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 8-18.
- [13] WANG J, HAN X, MA H, et al. Analysis and injection control of circulating current for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2280-2290.
- [14] WU M, MA X T, DONG Z W, et al. Impact of droop coefficient on dynamic voltage stability of DC grid[C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China. IEEE, 2018: 2666-2671.
- [15] Y H Z, Y G W, K L, et al. Droop control strategy of microgrid based on dynamic droop coefficient[J]. Measurement and Control Technology, 2018, 37(7): 127-131.
- [16] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 8-15.
WU Meng, HE Zhiyuan, YAN Fayou, et al. Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 8-15.
- [17] DEWANGAN L, BAHIRAT H J. Comparison of HVDC grid control strategies[C]//2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Bangalore, India. IEEE, 2017: 1-6.
- [18] KOUTSOUKIS N C, SIAGKAS D O, GEORGILAKIS P S, et al. Online reconfiguration of active distribution networks for maximum integration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2): 437-448.
- [19] 祁琪, 姜齐荣, 许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4664-4676.
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [20] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [21] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
XU Zheng, TU Qingrui, GUAN Minyuan, et al. Flexible DC transmission system[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [22] 申锦鹏, 李勇汇, 张玉琼, 等. 采用下垂控制的多端柔性直流输电系统功率可调节范围量化分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3110-3118.
SHEN Jinpeng, LI Yonghui, ZHANG Yuqiong, et al. Quantitative analysis of power regulating range of multi-terminal direct current transmission system with droop control[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 3110-3118.
- [23] 刘昊宇, 刘崇茹, 郑乐, 等. 直流电压准误差修正的 VSC-MTDC 系统协同优化下垂控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 117-126.
LIU Haoyu, LIU Chongrui, ZHENG Le, et al. Cooperative optimal droop control for VSC-MTDC system with quasi non-error DC voltage regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 117-126.
- [24] 姚雅涵, 姚伟, 熊永新, 等. 经多端直流并网的海上风电场调频协同控制和风机转速恢复策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3537-3547.
YAO Yahan, YAO Wei, XIONG Yongxin, et al. Coordinated frequency support and wind turbine preset restoration scheme of VSC-MTDC integrated offshore wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3537-3547.
- [25] 王秀茹, 刘刚, 王—振, 等. 一种适用于多端柔性直流输电系统的新型电压下垂控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 136-141.
WANG Xiuru, LIU Gang, WANG Yizhen, et al. Novel voltage droop control method for VSC based multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 136-141.
- [26] 刘英培, 谢乾, 梁海平. 柔性直流输电系统自适应虚拟惯性调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 129-136.
LIU Yingpei, XIE Qian, LIANG Haiping. Frequency regulation control strategy for flexible DC transmission system based on adaptive virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 129-136.
- [27] 何俊, 于华, 邓长虹, 等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1277-1285.
HE Jun, YU Hua, DENG Changhong, et al. Power supply guarantee strategy for key regional power grid load based on situation awareness in extreme weather[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1277-1285.
- [28] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术

与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.

[29] 郑少明, 刘一民, 董鹏, 等. 张北工程风电柔直汇集系统次、超同步振荡分析[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6): 608-617.
ZHENG Shaoming, LIU Yimin, DONG Peng, et al. Analysis of sub/super-synchronous oscillation between wind farm and MMC in Zhangbei Project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 608-617.

[30] 徐柯, 刘一民, 郑少明, 等. 环状柔直工程直流极闭锁判据及措施量计算方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 101-107.

XU Ke, LIU Yimin, ZHENG Shaoming, et al. DC blocking criterion and measure calculation method for VSC-HVDC grid of ring structure[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 101-107.

作者简介:



张秋玥

张秋玥(1999), 女, 硕士在读, 研究方向为电力电子化电力系统(E-mail: qiuyue.zhang@hhu.edu.cn);

王楚扬(1990), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统中的电力电子装备;

张犁(1985), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源变换器拓扑、控制及其可靠性分析。

A sagging control strategy for optimizing transmission capacity of flexible DC interconnection system

ZHANG Qiuyue, WANG Chuyang, ZHANG Li

(School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: With the increasing load and a large number of new energies connected to the grid, the flexible DC interconnection system is widely used. The flexible DC interconnection system based on sagging control strategy can realize automatic regulation of power and voltage according to sagging characteristics, but the transmission capacity of the system is limited by the capacities of different converter stations and requirement of voltage quality. So it is difficult to make full use of the transmission capacity of the system. An adaptive sagging control strategy for capacity optimization of flexible DC interconnection systems is proposed in this paper. By the proposed strategy, a sagging coefficient correction loop is added to gradually adjust the sagging coefficient of the corresponding converter station when the voltage or power is close to the limit. By the correction loop, the power can continue to increase without exceeding the limit. In addition, in order to reduce the influence of droop coefficient change on the traditional control and optimize the energy consumption characteristics of the system, a mathematical model is established with the goal of minimizing the adjustment rate of the power flow and the energy consumption of the power generation of the system. Then the non-dominated sorting in genetic algorithm (NSGA-II) is used to solve the model and the optimal correction gradient of each converter station can be obtained. Finally, PLECS is used to build a four-terminal flexible direct interconnection model which verifies the effectiveness and feasibility of the proposed strategy.

Keywords: flexible DC interconnection system; sagging control; converter station capacity; voltage quality; power transmission capacity; optimal correction gradient

(编辑 方晶)