

大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的高效初始化方法

连攀杰, 刘文焯, 孙华东*, 郑超, 张恒悦, 汤涌, 白杰伟

(电网安全与节能全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Efficient Initialization Method for Electromagnetic Transient Simulation System of Large-scale New Energy Connected to the Power Grid through VSC-HVDC

LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, SUN Huadong*, ZHENG Chao, ZHANG Hengyue, TANG Yong, BAI Jiewei

(State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute),

Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Power interaction occurs in the initialization process of different components in the electromagnetic transient simulation system of large-scale new energy connected to the power grid through HVDC based on voltage source converter (VSC-HVDC). This will lead to prolonged initialization time, increased difficulty, and deteriorated stationarity of waveform, which cannot meet the needs of subsequent electromagnetic transient fault simulation analysis. The article adopts the strategy for electromagnetic transient initialization based on power flow solutions, analyzes the interaction between different new energy equipment during the initialization process, and studies the initialization method of new energy stations based on clamp voltage sources. The initialization characteristics of VSC-HVDC under different control modes are revealed, and the initialization methods of multi-terminal VSC-HVDC considering different control modes are studied. To avoid power interaction during the initialization process between multiple converter stations, converter stations, and new energy stations, and improve initialization efficiency, an efficient initialization method for electromagnetic transient simulation systems of large-scale new energy connected to the power grid through VSC-HVDC is proposed. Finally, the full electromagnetic transient simulation systems under different scenarios are established in the PSD-PSModel full electromagnetic transient simulation software for initialization, verifying the rationality and effectiveness of the proposed initialization method.

KEY WORDS: electromagnetic transient; initialization; voltage source converter; new energy; PSModel

摘要: 大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统内不同元件初始化过程功率相互耦合, 导致初始化时间长、难度大、波形平稳性差, 无法快速进入稳态、开展电磁暂态故障仿真分析。文章基于潮流解的电磁暂态初始化策略, 分析初始化过程中不同新能源设备间的交互影响, 研究基于钳位电压源的新能源场站初始化方法; 揭示不同控制模式下柔直换流站的初始化特性, 研究计及不同控制模式的多端柔性直流的初始化方法; 为避免多换流站、换流站与新能源场站之间初始化过程中存在的功率交互, 提升初始化效率, 提出适用于大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的高效初始化方法。最后, 基于 PSD-PSModel 全电磁暂态仿真软件, 构建不同场景下全电磁暂态仿真系统进行初始化, 验证所提初始化方法的合理性和有效性。

关键词: 电磁暂态; 初始化; 柔性直流; 新能源; PSModel

0 引言

基于模块化多电平换流器的柔性直流能根据电网运行特性灵活调整控制模式, 无换相失败风险, 且易于组网, 是大规模新能源基地送出的关键技术, 具有广阔的应用前景^[1-4]。如何通过柔性直流技术实现未来大规模新能源基地安全、高效、经济送出, 并改善交流电网的调频调压能力, 是新型电力系统下电网规划运行面临的重要课题^[5-7]。

电磁暂态仿真能够准确模拟柔性直流、新能源等电力电子设备的动作过程, 是充分认识和掌握新型电力系统动态特性的关键技术。随着计算机性能的发展和仿真算法的革新, 我国已具备区域电网甚

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-202355385A-2-3-XG)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5100-202355385A-2-3-XG)。

至跨区电网的全电磁暂态仿真能力^[8-9]。精细化建立含大规模新能源基地、柔性直流的区域级电网全电磁暂态仿真系统,对于分析不同类型、不同位置交流故障下柔性直流、新能源等电力电子设备的响应特性,评估新能源脱网风险,综合比较不同新能源送出方案的安全稳定性能,具有重要意义^[10-11]。

电磁暂态仿真可以分为建模、初始化和故障仿真等主要步骤。其中,初始化是指求解基于电磁暂态模型的动态电力系统稳态解^[12],与模拟实际设备启动过程不同,初始化只需确保仿真系统中所有模型快速运行至指定的稳定状态。初始化既是电磁暂态仿真故障特性的前提,又能够初步校验电磁暂态模型和规划方案的合理性,是电磁暂态仿真的重要环节。

国内外学者对初始化方法做了大量研究,主要包括相量解法^[13]、电磁暂态法^[14]、基于潮流解的解析法^[15]和基于潮流解的仿真法。相量解法、电磁暂态法和基于潮流解的解析法计算复杂,难以用于含大量非线性元件的大规模电网的初始化计算。基于潮流解的仿真法能够依据机电暂态潮流计算结果灵活设计不同元件的初始化过程,使系统内的设备模型快速收敛至潮流计算状态,更加适用于区域级、跨区电力系统的全电磁暂态仿真^[16]。

大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统中既存在同步机、马达等传统交流设备,也包括新能源、多端柔直等电力电子设备。不同设备的电磁暂态模型对应不同的初始化方法:文献[17]设计了同步发电机、双馈风机及其控制系统的初始化方法;文献[18]研究马达的初始化方法;文献[19-20]研究常规直流的初始化方法;针对全控型电力电子器件的新能源和柔性直流等设备,文献[21]将潮流结果作为目标值输入到新能源、柔性直流的控制系统中,完成新能源、柔直的初始化。

上述文献对单个设备的初始化方法进行了详细研究,不同电力电子设备、不同控制策略具有不同的初始化特性,电力电子设备与电力电子设备、电力电子设备与传统交流设备之间的初始化过程均存在功率交互,导致初始化时间长、难度大,也很难快速定位初始化失败的原因。面对不同场景下的大规模新能源经柔直联网方案,需要消耗大量时间设计和修正初始化策略,严重影响了电磁暂态仿真的效率。如何高效实现大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的初始化,成为目前构建含大规

模新能源基地、柔性直流的区域级电网详细全电磁暂态仿真系统的难点和关键。

本文针对大规模新能源经柔直联网的典型场景,研究新能源场站、多端柔性直流等设备模型的初始化特性。针对不同设备、不同控制模式初始化过程中的交互影响,提出适用于大规模新能源经柔直联网系统电磁暂态仿真的高效初始化方法。最后,基于PSD-PSModel全电磁暂态仿真软件,针对不同场景下大规模新能源经柔直联网系统进行初始化,验证所提初始化方法的合理性和有效性。

1 大规模新能源经柔直联网的典型场景

图1为大规模新能源经柔直联网典型场景,送受端交流主网分别接入多个柔直换流站(简称换流站),换流站之间通过高压直流线路相连,考虑送受端间的直流输电通道有限,多端柔直可能呈“H”型拓扑结构。

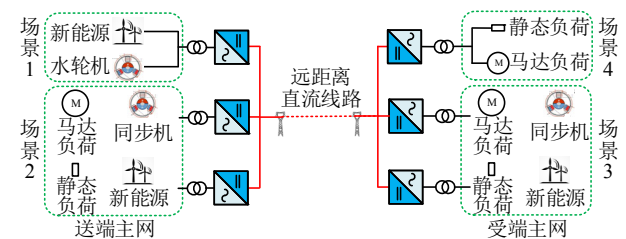


图1 大规模新能源经柔直联网典型场景图

Fig. 1 Typical scenario diagram of large-scale new energy connected to the power grid through VSC-HVDC

高压大容量柔性直流的拓扑结构和运行方式灵活复杂,需综合考虑送受端电网的网架结构及地质地形等复杂条件,合理选择柔直换流站落点及控制模式,确定大规模新能源经柔直联网方案。目前存在如下典型场景:

1) 换流站接入清洁能源孤岛电网。

大规模新能源基地经交流线路汇集后,直接经换流站将功率送出,与送端主网无交流电气联接,换流站采用无源型或构网型控制模式。

2) 换流站接入送端交流主网。

大规模新能源基地分别接入送端交流主网,然后经换流站将功率送出,清洁能源基地与主网存在交流电气联接,换流站采用跟网型或构网型控制模式。

3) 换流站接入受端交流主网。

柔直换流站接入受端电网的负荷中心,受端电网内包含新能源、同步机、静态负荷和动态负荷等

多类型设备。换流站采用定直流电压或定有功功率的跟网型控制模式。

4) 换流站接入负荷孤网。

柔直换流站接入孤网的负荷, 孤网内只包括静态负荷和动态负荷。换流站采用无源型或构网型控制模式向负荷孤网供电。

2 基于钳位电压源的新能源场站初始化方法

2.1 新能源场站模型的初始化特性分析

图 2 为新能源场站的典型拓扑, 直驱风机、双馈风机、光伏和储能等新能源设备的电磁暂态详细模型如附图 A1 所示。

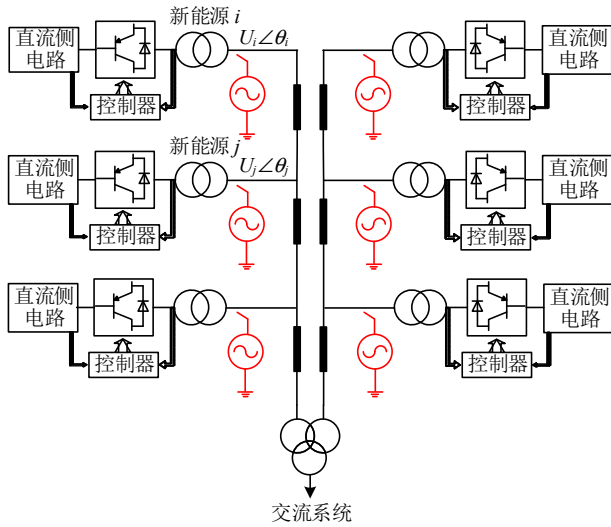


图 2 新能源场站的拓扑结构

Fig. 2 The topology of new energy stations

换流器采用基于派克变换的双环控制策略, 控制结构如附图 A2 所示。首先, 将静止坐标系下交流量派克变换为 dq 轴旋转坐标系下的直流量, 分别控制 dq 轴直流量, 将测量值稳定在设定值附近; 然后, 将直流量派克反变换为交流量; 最后调制为开关信号。其中, 派克变换矩阵 T_{abc-dq} 如式(1)所示。

$$T_{abc-dq} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 θ 为电网中 A 相交流电压 u_{sa} 的相位, 可以通过式(2)所示的锁相环获得相位。

$$\theta_{pll} = [(G_{pll} + \frac{1}{sT_{pll}})u_{sq}^{cf} + \omega_0] \frac{1}{s} \quad (2)$$

式中: θ_{pll} 为锁相环输出的相位; G_{pll} 、 T_{pll} 分别为锁相环 PI 控制中的比例、积分系数; u_{sq}^{cf} 为控制器输

出的 q 轴电压; ω_0 为初始角频率。

作为控制器交-直流信号的转换环节, 派克变换是影响换流器稳定性能的关键。若初始化过程中电网能迅速建立稳定的交流电压, 控制器可以获得准确相位 ($\theta_{pll} = \theta$), 派克变换有效, 控制器能够将测量值控制为设定值, 逐步过渡至指定状态, 完成新能源模型的初始化。若初始化过程中电网无法迅速建立稳定的交流电压, 控制器不能获得准确相位 ($\theta_{pll} \neq \theta$), 派克变换后的信号与实际电网存在较大差异, 控制器无法将测量值控制为设定值, 新能源无法完成初始化。

若多台新能源同时初始化, 新能源 i 初始化过程中产生的功率波动不仅导致 U_i 波动, 也会导致 U_j 波动, 进而影响新能源 j 控制器的锁相, 恶化新能源 j 的初始化性能, 导致新能源 j 无法完成初始化; 若先初始化新能源 i , 待新能源 i 初始化完成后再初始化新能源 j , 虽能够避免同时初始化新能源模型造成的功率波动, 但极大地延长了新能源场站的初始化时间, 降低了初始化效率。

2.2 基于钳位电压源的初始化方法

为避免初始化过程中新能源模型间功率交互恶化新能源模型的初始化性能, 提升新能源场站模型的初始化效率。本文提出一种基于钳位电压源的初始化方法:

首先, 采用基于潮流解的电磁暂态初始化策略, 在仿真 0 时刻之前, 将潮流结果作为新能源并网换流器的指令值(式(3)), 如图 2 所示红色区域所示, 在新能源换流器升压变一次侧接入含开关的钳位电压源, 并根据潮流结果确定钳位电压源的幅值 U_s 和相角 θ_s (式(4))。

$$\begin{cases} P_{ref}^{GC} = P_0^{GC} \\ Q_{ref}^{GC} = Q_0^{GC} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_s = U_{s0} \\ \theta_s = \theta_{s0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{ref}^{GC} 、 Q_{ref}^{GC} 分别为有功功率、无功功率指令值; P_0^{GC} 、 Q_0^{GC} 分别为潮流中的有功功率、无功功率; U_{s0} 、 θ_{s0} 分别为潮流中的电压幅值和相角。

然后, 在换流器和交流系统的初始化过程中, 由钳位电压源吸收新能源模型间的交互功率, 消除换流器与其他设备之间的影响, 并建立稳定的交流电压供新能源控制器锁相, 待所有新能源换流器功率上升至指定值、交流系统启动后, 切除钳位电压

源,完成新能源场站的初始化。

与光伏、直驱风机相比,双馈风机存在感应发电机设备,且与交流电网直接相连,需首先设定感应发电机运行在定转速模式,并根据机电结果设置电机转速^[22],待双馈风机运行稳定后,再切换为定转矩或其他指定运行模式。

3 计及不同控制模式的多端柔性直流的初始化方法

根据锁相角 θ_{pll} 生成方式不同,将柔直换流站运行模式分为无源型、构网型和跟网型控制模式,不同控制面向不同的电网需求,也存在不同的初始化特性。

3.1 跟网型控制模式的初始化方法

与新能源并网换流器一致,柔直跟网型控制模式同样检测并网点交流电压生成锁相角 θ_{pll} ,控制器锁相环影响换流站运行的稳定性。因此,柔直跟网型控制仍采用基于钳位电压源的初始化方法,如式(5)所示:

$$\begin{cases} P_{ref}^{MMC} = P_0^{MMC} \\ V_{deref}^{MMC} = V_{dc0}^{MMC} \\ Q_{ref}^{MMC} = Q_0^{MMC} \\ V_{acref}^{MMC} = V_{ac0}^{MMC} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{ref}^{MMC} 、 Q_{ref}^{MMC} 、 V_{deref}^{MMC} 和 V_{acref}^{MMC} 分别为控制器有功功率、无功功率、直流电压和交流电压的指令; P_0^{MMC} 、 Q_0^{MMC} 、 V_{dc0}^{MMC} 和 V_{ac0}^{MMC} 分别为潮流结果的有功功率、无功功率、直流电压和交流电压。将潮流结果作为控制指令,并由钳位电压源提供稳定的交流电压供换流器锁相,吸收不平衡功率,待换流站功率上升至指定值、交流电网启动后,切除钳位电压源,完成柔直跟网型控制模式的初始化。

3.2 构网型控制模式的初始化方法

构网型控制模式尚未完全统一,本文以基于虚拟同步^[23]的构网型控制模式(简称构网型控制)为例,研究构网型控制的初始化方法。附图A3为构网型控制模式的结构图,构网型控制参考同步发电机的转子运动方程和励磁系统,如式(6)—(8)所示:

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_{ref}^{MMC} - P_{meas}^{MMC} - D(\omega - \omega_0) \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_{pll}}{dt} = \omega \quad (7)$$

$$\frac{dE}{dt} = Q_{ref}^{MMC} - Q_{meas}^{MMC} - K(V_{acref}^{MMC} - V_{acmeas}^{MMC}) \quad (8)$$

式中: T_J 为转动惯量; D 为阻尼转矩; ω 为角频率; E 为构网型控制的内电势; K 为交流电压调节系数; P_{meas}^{MMC} 、 Q_{meas}^{MMC} 和 V_{acmeas}^{MMC} 分别为有功功率、无功功率和交流电压的测量值。构网型控制所需的 θ_{pll} 不依赖系统交流电压,可以直接根据式(5)设置控制指令,进行构网型控制的初始化。

3.3 无源型控制模式的初始化方法

柔直无源型控制模式能够同时控制并网点电压的幅值和频率,在新能源送出、无源网络供电等场景开展了广泛运用。无源型控制结构如附图A4所示,由固定角频率 ω_{ref} 积分生成 θ_{pll} :

$$\theta_{pll} = \frac{\omega_{ref}}{s} \quad (9)$$

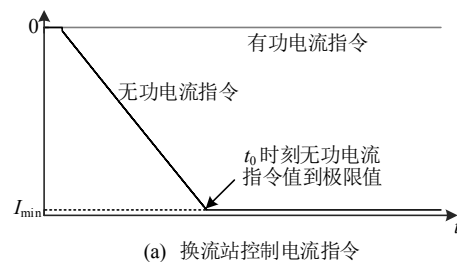
无源型控制通过调节交流电压 d 轴分量 u_{sd} 、 q 轴分量 u_{sq} 维持并网点电压幅值恒定,在不过流的前提下,为电网提供一个恒定的电压源。与其他控制模式不同,无源型控制中 θ_{pll} 始终恒定,初始化过程中无需电网提供交流电压支撑。

无源型控制在维持交流电压恒定的过程中,与电网交互的功率如下:

$$P_{meas}^{MMC} = \frac{V_{MMC} V_E}{X} \sin \delta \quad (10)$$

$$Q_{meas}^{MMC} = \frac{V_E (V_{MMC} - V_E \cos \delta)}{X} \quad (11)$$

式中: V_{MMC} 、 V_E 分别为换流站和网内其他电压源的电压幅值; δ 为换流站与网内其他电压源的相位差; X 为换流站与其他电压源的等值电抗。无源换流站通过调整交流功率维持并网点电压的幅值和频率恒定。在初始化过程中,若并网点近区存在其他电源(如钳位电压源),柔直为维持并网点电压的幅值和相角恒定,将与电网产生大量的交互功率,导致无源换流站的电流指令超过限幅,影响换流站控制系统的稳定性,无法完成初始化。图3为在并网点近区加入钳位电压源后柔直无源换流站的响应情况,在 t_0 时刻无源换流站的电流越限,换流站失去电压控制能力,交流功率反复振荡,无源换流



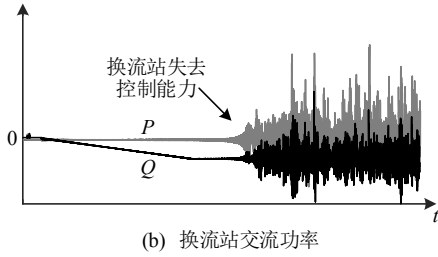


图 3 加入钳位电压源后无源换流站的响应

Fig. 3 Response characteristics of island converter stations with clamp voltage sources

站不能到达指定稳态。

网内钳位电压源影响无源型换流站初始化的稳定性，但电网内的新能源等设备初始化需钳位电压源进行支撑，无源换流站与电网内其他设备的初始化需求存在矛盾。若柔直换流站初始化完成后作为交流电压源，再进行网内其他设备的初始化，则仿真时间增加，初始化效率大大降低。

针对电网内其他设备和无源换流站初始化过程中的不同需求，文章提出一种无源型控制模式的初始化方法：

如图 4 所示，在仿真 0 时刻之前，将无源换流站与交流电网断开，在电网侧添加钳位电压源，并设置 2~3 倍的换流站过流能力。然后，基于钳位电压源初始化交流电网，基于开路状态初始化无源换流站。待交流系统和无源换流站完成初始化后，断开钳位电压源的同时接入柔直换流站。在柔直换流站和交流系统稳定后，完成柔直无源站的初始化。

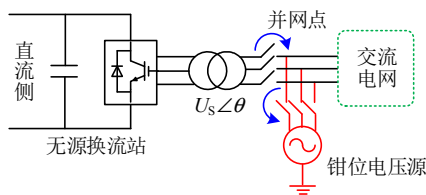


图 4 无源型控制模式的初始化方法图

Fig. 4 Diagram of initialization method for island control

该方法能够同时满足柔直无源换流站和交流电网初始化过程中的不同需求，避免依次初始化无源换流站和交流电网带来的效率降低问题，更加适用于大规模新能源经柔直联网系统的电磁暂态仿真。

3.4 多换流站初始化的交互影响分析

多换流站通过直流线路相连，不同换流站初始化过程存在耦合，初始化过程中仍需计及其他换流站状态，满足如下约束。

1) 跟网型(非定直流电压控制)换流站、构网型换流站和无源型换流站的初始化需要直流侧提供

稳定的直流电压源做支撑，需首先初始化定直流电压的跟网型换流站，确保定直流电压站能维持直流电压稳定，再对其他换流站进行初始化。

2) 不同换流站间的功率交互如下所示：

$$\int_0^t (\sum_{i=1}^N P_i(t) - \sum_{j=1}^M R_{dcj} I_{dcj}^2(t)) = \frac{1}{2} C_{eq} \sum_{i=1}^N U_{dci}^2(t) \quad (12)$$

式中： $P_i(t)$ 、 $U_{dci}(t)$ 分别为第 i 个换流站在 t 时刻的有功功率和直流电压； $I_{dcj}(t)$ 为第 j 条直流线路在 t 时刻的直流电流； R_{dcj} 为第 j 条直流线路的直流电阻； C_{eq} 为柔直侧的等效电容； N 为换流站总数； M 为直流线路总数。

定直流电压站作为直流系统的平衡站，负责吸收不平衡功率，维持直流电压恒定，考虑到定直流电压控制的换流站容量存在限值，在初始化各柔直换流站期间，需注意各换流站的有功功率的波动，确保满足如下约束：

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_i(t) + \sum_{j=1}^{N_2} P_j(t) \leq P_{dcm} \quad (13)$$

式中： N_1 为吸收有功功率的换流站总数； N_2 为输出有功功率的换流站总数； P_{dcm} 为定直流电压站的功率极限。

多端柔性直流输电系统的初始化，需要综合考虑换流站接入电网状态、柔直控制模式和其他换流站状态等多方面因素。

4 大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的高效初始化策略

针对不同设备、不同控制模式初始化过程中的交互影响，研究适用于大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的高效初始化策略。首先，初步评估特定方案下电磁暂态初始化的可行性；然后，研究各设备模型的初始化时序；最后，进行仿真结果校核，确保初始化精度满足后续仿真要求，从而实现大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的高效初始化。

1) 基于潮流数据的电磁暂态初始化评估。

大规模新能源经柔直联网方案中的网架结构、交流设备参数均来自于机电暂态数据，但新能源机电暂态模型忽略了锁相、电流内环等关键环节，机电暂态校验形成后的大规模新能源联网方案，无法确保满足新能源电磁模型的初始化需求。需先对机电暂态形成的大规模新能源送出方案进行评估，排

除因机电、电磁模型差异导致初始化失败的风险。

如图5所示,将柔直无源型换流站、构网型换流站替换为钳位电压源进行仿真,校核该电网中的新能源电磁模型能否完成初始化:在切除新能源侧的钳位电压源后,判断新能源电磁模型能否稳定运行,若可以稳定运行,则继续开展后续初始化;若无法稳定运行,需在新能源近区配置构网型储能或调相机等措施,提升新能源末端的电压控制能力,然后再次进行评估,直至新能源电磁模型能够维持稳定运行。

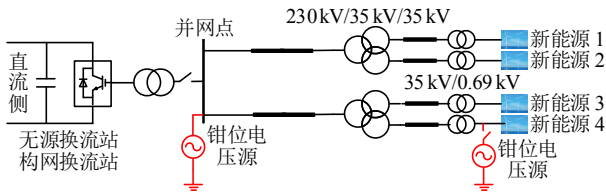


图5 基于潮流数据的电磁暂态初始化评估

Fig. 5 Electromagnetic transient initialization evaluation diagram based on power flow

2) 确定多端柔性直流换流站的解锁时序和初始化策略。

首先解锁定直流电压换流站,再根据式(13)的初始化原则,分别设置 t_1 、 t_2 、 \dots 、 t_N 时刻解锁其他换流站,根据换流站的控制模式确定换流站的初始化策略,并将换流站过流能力设置为2~3倍。

3) 确定仿真系统内各设备的初始化时序,开展大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的初始化仿真。

若换流站运行在跟网型控制模式,则按照如下步骤开展初始化仿真:

①启动接入电网内的所有钳位电压源,交流同步机以电压源的形式启动,马达以定转速方式启动。

②解锁新能源并网换流器,通过控制器作用将新能源的交流功率上升至指定值。

③在 t_i 时刻解锁柔直换流站,通过控制器作用逐步将柔直换流站过渡至指定稳态。

④切除换流站侧的钳位电压源。

⑤切除新能源侧的钳位电压源。

⑥解锁交流同步机、马达的转速。

⑦解锁同步机的励磁、调速系统,并将柔直的过流能力恢复正常值。

若换流站 i 运行在构网型控制模式,则按照如下步骤开展初始化仿真:

①启动接入电网内的所有钳位电压源,交流同

步机以电压源的形式启动,马达以定转速方式启动。

②解锁新能源并网换流器,通过控制器作用将新能源的交流功率上升至指定值。

③在 t_i 时刻解锁柔直换流站,通过控制器作用逐步将柔直换流站过渡至指定稳态。

④切除新能源侧的钳位电压源。

⑤解锁交流同步机、异步机的转速。

⑥解锁交流同步机的励磁、调速系统,并将柔直的过流能力恢复正常值

若换流站 i 运行在无源型控制模式,则按照如下步骤开展初始化仿真:

①启动接入电网内的所有钳位电压源,交流同步机以电压源的形式启动,马达以定转速方式启动。

②解锁新能源并网换流器,通过控制器作用将新能源的交流功率上升至指定值。

③在 t_i 时刻解锁换流站,通过控制器作用将柔直换流站过渡至指定稳态,换流站控制交流电压幅值和频率恒定。

④切除新能源侧的钳位电压源。

⑤切除换流站侧钳位电压源,同时将无源换流站并入交流电网。

⑥解锁交流同步机、马达的转速。

⑦解锁同步机的励磁、调速系统,并将柔直的过流能力恢复正常值。

4) 开展初始化精度校核。

在全电磁暂态仿真系统完成初始化后,根据下式进行功率及交流电压校核,确保初始化精度满足仿真需求。

$$\begin{cases} \left| \frac{P_i - P_{0i}}{P_{0i}} \right| \times 100\% \leq 1\% \\ |P_i - P_{0i}| \leq \Delta P_{ERR} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \left| \frac{Q_i - Q_{0i}}{Q_{0i}} \right| \times 100\% \leq 1\% \\ |Q_i - Q_{0i}| \leq \Delta Q_{ERR} \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为初始化后第 i 条线路的有功功率和无功功率; P_{0i} 、 Q_{0i} 分别为潮流结果中第 i 条线路的有功功率和无功功率; ΔP_{ERR} 、 ΔQ_{ERR} 分别为有功功率和无功功率允许的最小误差。

若初始化结果精度不满足需求,需进一步分析差异产生的原因,修改模型后重新进行初始化。

5 仿真实验

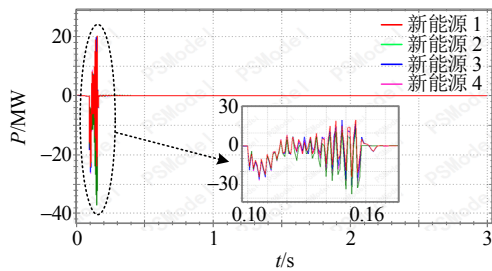
在由中国电力科学研究院独立研制开发的

PSD-PSModel 电磁暂态仿真软件^[24-25]中,运用提出的大规模新能源经柔直联网仿真系统高效初始化方法,分别构建典型场景和实际电网的电磁暂态仿真系统,验证所提方法的合理性和有效性。

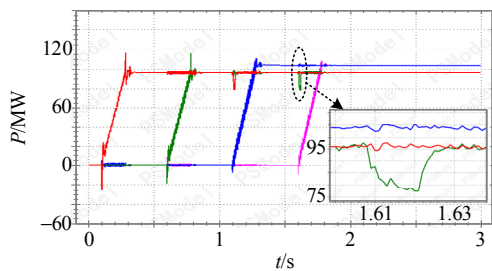
5.1 新能源场站初始化方法验证

搭建如图 5 所示的新能源场站仿真系统,将换流站替换为交流电压源,仿真参数如附表 A1 所示,采用不同方法对新能源场站进行初始化:1)同时初始化方法,所有新能源在 0.1s 解锁,在控制器作用下升功率;2)分批初始化方法,依次在 0.1、0.6、1.1 和 1.6s 解锁换流器;3)基于钳位电压源的初始化方法,仿真 0 时刻前在各新能源换流器并网点加入钳位电压源,0.1s 同时解锁所有换流器,0.5s 切除钳位电压源。

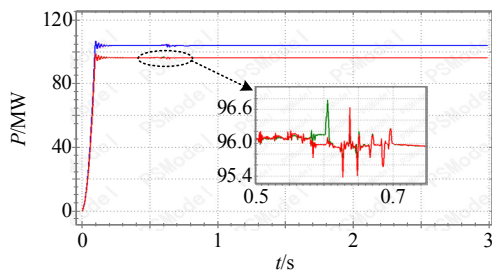
图 6 分别为不同初始化方法下新能源场站的有功功率波形。采用同时初始化方法,新能源并网换流器之间相互影响严重,交流电压迅速升高,引发保护动作,换流器脱网,初始化失败;采用分批初



(a) 同时初始化



(b) 分批初始化



(c) 基于钳位电压源初始化

图 6 新能源场站的初始化波形

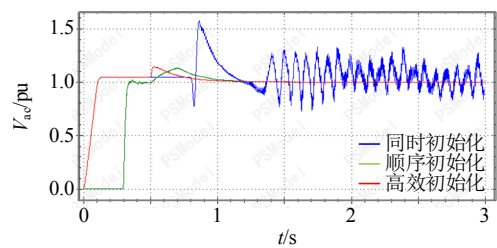
Fig. 6 The initialization waveform of new energy stations

始化的方法,新能源换流器间的相互影响降低,新能源换流器的解锁会导致其他换流站 20 MW 左右的功率波动,新能源模型能够在 2.0s 左右完成初始化。采用基于钳位电压源的初始化方法,新能源功率上升平稳,切除钳位电压源后最大功率波动仅为 0.8MW,且只需 0.8s 即可完成初始化;基于钳位电压源的新能源场站初始化方法,能够有效避免初始化过程中不同新能源设备模型的交互功率,初始化波形更加平稳,效率更高。

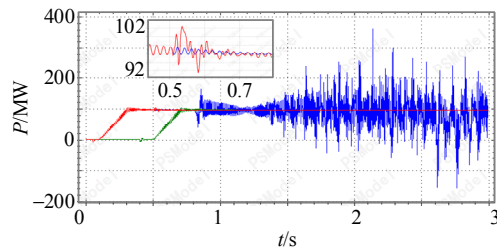
5.2 柔性直流的初始化方法验证

搭建图 5 所示的新能源场站经柔直孤岛送出仿真系统,分别采用不同方法对柔直和新能源场站进行初始化:1)同时初始化,0s 前在新能源换流器并网点加入钳位电压源,0.1s 解锁新能源并网换流器和柔直定直流电压站,0.3s 解锁柔直无源换流站,0.5s 切除新能源侧的钳位电压源;2)顺序初始化方法^[26-27],不在新能源换流器并网点加入钳位电压源,0.1s 柔直定直流电压站,0.3s 解锁柔直无源换流站,0.5s 解锁新能源并网换流站,直接升功率;3)文章提出的高效初始化,仿真 0 时刻前在各新能源换流器加入钳位电压源,并将柔直无源站设置为开路状态,0.1s 解锁新能源并网换流器和柔直定直流电压站,0.2s 切除新能源侧的钳位电压源,0.3s 解锁柔直无源换流站,0.5s 切除柔直无源站侧钳位电压源,无源换流站并网。

图 7(a)为柔直换流站交流电压波形,图 7(b)为



(a) 无源换流站交流电压有效值



(b) 新能源有功功率波形

图 7 新能源场站经柔直孤岛送出的初始化波形

Fig. 7 The initialization waveform of the new energy station connected to the power grid through VSC-HVDC

新能源有功功率波形。采用同时初始化方法, 0.5 s 前柔直无源换流站与新能源侧的钳位电压源存在功率交互, 柔直无源站无法维持稳定运行, 切除钳位电压源后, 无源换流站不能控制交流电压恒定, 交流电压振荡, 新能源场站无法完成初始化; 采用顺序初始化方法, 能够完成新能源经柔直联网系统的初始化, 但柔直无源站控制交流电压恒定后新能源方能解锁, 初始化时间延长, 1.1 s 后系统方能稳定运行; 采用本文提出的高效初始化方法, 柔直换流站与新能源场站能够同时初始化, 0.7 s 内系统即可进入稳定状态。与顺序初始化方法相比, 本文所提方法的初始化速度快, 且初始化过程中交流功率波动小, 更加平稳。

5.3 大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真初始化方法验证

搭建如图 1 所示的电磁暂态仿真系统, 4 个交流电网经多端柔直跨区互联, 各交流电网的仿真规模如附表 A2 所示, 该系统覆盖了实际电网的设备模型种类。柔性直流换流站的设备参数和控制模式如附表 A3 所示。

首先开展基于潮流数据的电磁暂态初始化评估, 鉴于 S1、S4 换流站采用无源控制模式, S2 换流站采用构网型控制模式, 因此先将 S1、S2 和 S4 换流站替换为钳位电压源, 分析各电网内新能源和马达等设备能否完成初始化。

附图 A5、A6 为电网 1、2 新能源设备的初始化结果。2.3 s 前, 各电网的新能源模型在钳位电压源的支撑下, 通过控制器作用逐步将功率上升至指定值, 2.3 s 切除钳位电压源后, 新能源模型的交流功率存在小幅波动(黑色虚线所示), 在 2.5 s 左右恢复稳定, 电网 1、电网 2 的新能源能够完成初始化。附图 A7 为电网 4 马达的初始化结果, 在转速解锁前后, 马达的交流功率基本不变, 能够维持稳定运行。上述电网内的新能源、马达等设备均能够平稳运行, 完成潮流数据的电磁暂态初始化评估。

然后, 确定柔直换流站的解锁时序: 0.1 s 解锁 S3 换流站、0.5 s 解锁 S2 换流站、1.0 s 同时解锁 S1、S4 换流站。根据各换流站的控制模式, 确定换流站及接入电网的初始化策略如下:

针对 S1 换流站及接入的交流电网, 设置 0.0 s 启动新能源侧和 S1 换流站的钳位电压源, 0.1 s 解锁新能源设备, 1.0 s 解锁 S1 换流站, 2.3 s 切除新能源侧钳位电压源, 3.0 s 切除 S1 换流站的钳位电

压源, 同时并入 S1 换流站。

针对 S2 换流站及接入的交流电网, 设置 0.0 s 启动新能源侧钳位电压源、同步机和马达, 0.1 s 解锁新能源设备, 0.5 s 解锁柔直换流站, 2.3 s 切除新能源侧钳位电压源, 2.5 s 解锁交流同步机和马达的转速, 2.8 s 启动交流同步机的励磁和调速系统。

针对 S3 换流站及接入的交流电网, 设置 0.0 s 启动交流同步机、马达、新能源侧和柔直侧的钳位电压源, 0.1 s 解锁新能源设备和柔直换流站, 1.6 s 切除柔直侧钳位电压源, 2.3 s 切除新能源侧钳位电压源, 2.5 s 解锁交流同步机和马达的转速, 2.8 s 启动交流同步机的励磁和调速系统。

针对 S4 换流站及接入的交流电网, 设置 0.0 s 启动钳位电压源, 1.0 s 解锁换流站, 2.5 s 切除 S4 钳位电压源, 并入换流站, 3.0 s 解锁马达转速。

图 8 为多端柔性直流的初始化波形, 其中: 图 8(a)为双极直流电压, 红色、蓝色曲线分别表示极 1 和 2 的直流电压; 图 8(b)为换流站并网点交流电压, 图 8(c)为换流站有功功率, 图 8(d)为换流站无功功率, 红色、蓝色、绿色、粉色曲线分别代表 S1、S2、S3 和 S4 换流站。在 4.0 s 内, 各换流站的直流电压、交流电压和交流功率均到达稳定状态, 初始化过程中 S3 能够维持直流电压恒定, 柔直系统能够维持稳定运行。

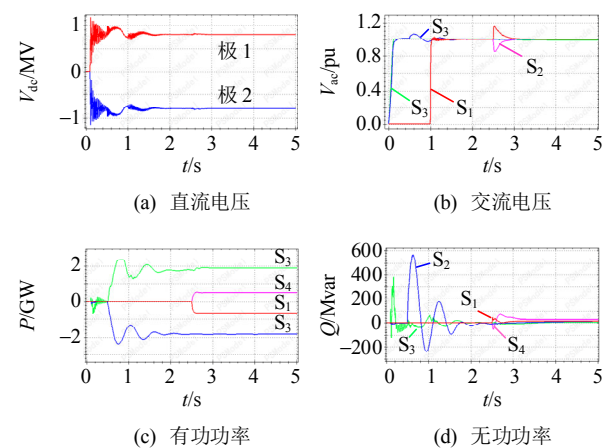


图 8 多端柔性直流的初始化波形

Fig. 8 The initialization waveform of multi VSC-HVDC

图 9 为新能源设备的初始化波形, 在钳位电压源支撑期间, 新能源交流功率在控制系统的作用下, 0.3 s 内到达指定值, 在 2.3 s 切除钳位电压源和 2.5 s 无源换流站接入之后, 新能源模型的交流功率存在波动, 但均能迅速恢复稳定。

图 10 为交流同步机的初始化波形, 在 2.5 s 前,

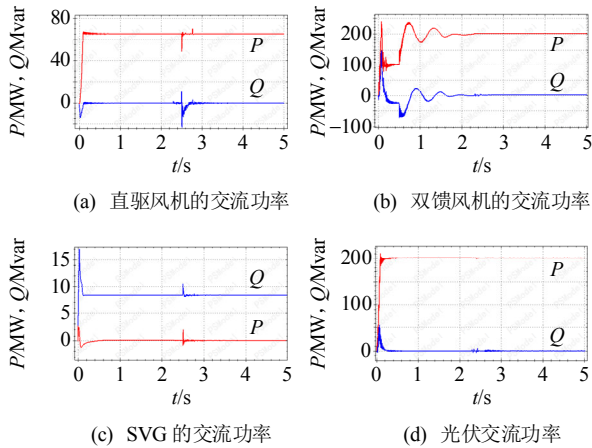


图 9 新能源的初始化波形

Fig. 9 The initialization waveform of new energy

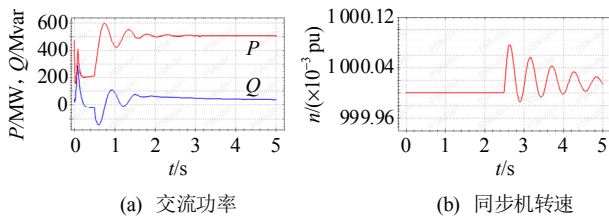


图 10 同步机的初始化波形

Fig. 10 The initialization waveform of synchronous machine

同步机的转速保持不变，交流功率逐步过渡值稳定值，2.5s 解锁转速后，转速开始极小幅度的波动，交流功率基本维持稳定。图 11 为负荷设备的初始化波形，静态负荷模型的功率能够维持稳定。马达在 2.5s 之前采用了定转速运行模式，交流功率上升至指定值，2.5s 解锁马达转速后，转速小幅摇摆，电磁转速保持恒定。

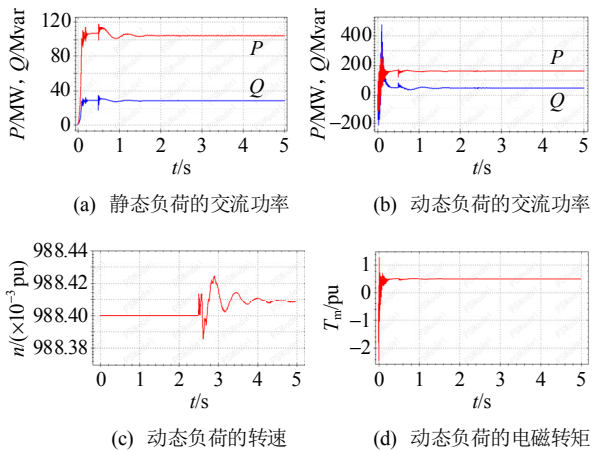


图 11 负荷设备的初始化波形

Fig. 11 The initialization waveform of load

多端柔性直流和各交流电网全电磁暂态仿真系统的初始化校核结果如表 1 所示。所有设备的初

始化结果与潮流结果基本一致，最大误差不超过 1%或 1 MVA。

表 1 初始化精度对比

Table 1 Comparison of initialization accuracy

参数	电磁暂态初始化结果(4s时刻)	潮流结果	绝对误差	相对误差/%
S1 换流站有功功率/MW	-1296.4	-1296.6	0.2	0.01
S1 换流站无功功率/Mvar	-52.8	-53.2	0.4	0.70
S2 换流站有功功率/MW	-3714.8	-3700.0	14.8	0.40
S2 换流站无功功率/Mvar	6.7	6.8	0.1	1.50
S3 换流站有功功率/MW	3862.0	3893.8	31.8	0.80
S3 换流站无功功率/Mvar	0	0	0	0.00
S4 换流站有功功率/MW	959.8	959.4	0.4	0.40
S4 换流站无功功率/Mvar	50.5	50.5	0	0.00
新能源有功功率/MW	65	65	0	0.00
新能源无功功率/Mvar	0	0	0	0.00
同步机有功功率/MW	495	500	5	1.00
同步机无功功率/Mvar	37.5	37.7	0.2	0.50
马达有功功率/MW	522	522	0	0.00
马达无功功率/Mvar	171	171	0	0.00
静态负荷有功功率/MW	58	58	0	0.00
静态负荷无功功率/Mvar	19	19	0	0.00

为进一步验证本文提出的电磁暂态初始化方法的实用性，结合我国电网情况，分别构建西北清洁能源经柔直送出、西南清洁能源经柔直送出、省内柔直互联、孤岛联网供电等不同场景下的大规模新能源经柔直联网仿真系统。仿真系统的电网规模如附表 A4 所示，最大规模为 18522 个三相交流节点，3064 台新能源设备，998 个交流同步机，881 台马达，1218 台静态负荷，4 端柔性直流。文章提出的初始化策略，效率高，初始化过程平稳，与目前文献[28-29]相比，能应对更大规模、更加复杂仿真系统的初始化，所有系统均能在 4.0s 内进入稳定状态，能够满足后续电磁暂态故障仿真需求。

6 结论

本文分析了大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统中不同设备模型、不同控制模式的初始化特性，提出适用于大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的高效初始化策略，主要结论如下：

1) 电磁暂态仿真系统初始化过程与设备类型、控制模式密切相关，需定制化设定不同的大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的初始化方法，确保各设备模型快速进入指定稳态。

2) 提出的基于钳位电压源的初始化方法，能

够避免初始化过程中换流器与换流器、换流器与其他设备间相互影响,提升新能源场站的初始化效率,提高初始化过程的稳定性。

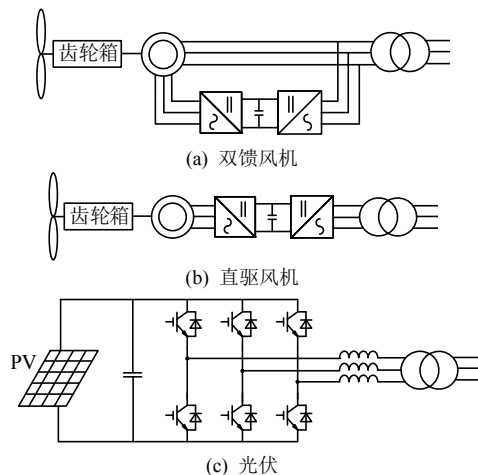
3) 提出的适用于不同控制模式的多端柔性直流换流站的高效初始化方法,实现了不同联网场景下多端柔性直流的高效初始化。所提初始化方法对于构建沙戈荒清洁能源基地经柔直送出、柔直孤岛供电、区域电网经柔直异步互联等不同场景的电磁暂态仿真系统,具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8(in Chinese).
- [2] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren, et al. VSC-HVDC transmission system[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2016(in Chinese).
- [3] 连攀杰, 刘文焯, 孙华东, 等. 混合级联多端直流暂态过电压机理及抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5037-5050.
LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, SUN Huadong, et al. Transient overvoltage mechanism and suppression measures of hybrid cascade multi terminal HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5037-5050(in Chinese).
- [4] 董新洲, 汤涌, 卜广全, 等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3118.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3118(in Chinese).
- [5] LIANG Wei, SHEN Chen, SUN Huadong, et al. Overvoltage mechanism and suppression method for LCC-HVDC rectifier station caused by sending end AC faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(2): 1299-1302.
- [6] MATEVOSYAN J, MACDOWELL J, MILLER N, et al. A future with inverter-based resources: finding strength from traditional weakness[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(6): 18-28.
- [7] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27(in Chinese).
- [8] 刘文焯, 李霞, 穆世霞, 等. 一种电磁暂态异步并行计算方法及装置: 中国, CN201910361932. 1[P]. 2024-04-26.
LIU Wenzhuo, LI Xia, MU Shixia, et al. Electromagnetic transient asynchronous parallel computing method and device: CN, CN201910361932. 1[P]. 2024-04-26(in Chinese).
- [9] 熊卿, 张路寅, 张庆华, 等. 适应新型电力系统的高性能电磁暂态仿真技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 43-52.
XIONG Qing, ZHANG Luyin, ZHANG Qinghua, et al. High-performance electromagnetic transient simulation technology and application for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 43-52(in Chinese).
- [10] 孙华东, 赵兵, 徐式蕴, 等. 高比例电力电子电力系统强度的定义、分类及分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7039-7049.
SUN Huadong, ZHAO Bing, XU Shiyun, et al. Definition, classification, and analysis method of the strength of power system integrated with high penetration of power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7039-7049(in Chinese).
- [11] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7796-7809.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7809(in Chinese).
- [12] LOMBARD X, MAHSEREDJIAN J, LEFEBVRE S, et al. Implementation of a new harmonic initialization method in the EMTP[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1343-1352.
- [13] APRILLE T J, TRICK T N. Steady-state analysis of nonlinear circuits with periodic inputs[J]. Proceedings of the IEEE, 1972, 60(1): 108-114.
- [14] DOMMEL H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(4): 388-399.
- [15] WANG Liwei, JATSKEVICH J, FOROOSH S C. A VBR induction machine model implementation for SimPowerSystem toolbox in Matlab-Simulink[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-6.
- [16] 翁华. 大规模交直流系统电磁暂态仿真和稳定控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

- WENG Hua. Research on electromagnetic transient simulation and stability control for large-scale AC/DC power systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014(in Chinese).
- [17] 董毅峰. 适用于低算力平台的大规模新能源电网电磁暂态仿真技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
DONG Yifeng. A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022(in Chinese).
- [18] 刘翀, 朱艺颖, 郭强, 等. 大规模感应电动机实时仿真简化方法及初始化问题研究[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 404-411.
LIU Chong, ZHU Yiyang, GUO Qiang, et al. Simplification and initialization of large-scale induction motor in real-time simulation[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 404-41(in Chinese).
- [19] 陈绪江, 张星, 田芳, 等. 含大量电磁直流模型的机电-电磁暂态混合仿真技术研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1203-1210.
CHEN Xujiang, ZHANG Xing, TIAN Fang, et al. Electromechanical-electromagnetic hybrid simulation technology with large number of electromagnetic HVDC models[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1203-1210(in Chinese).
- [20] 汪芳宗, 李默, 宋新立, 等. 基于显式保积方法的电磁暂态初始化计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2512-2521.
WANG Fangzong, LI Mo, SONG Xinli, et al. Initialization of electromagnetic transient simulation using explicit volume-preserving algorithm[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2512-2521(in Chinese).
- [21] 叶小晖. 电力系统全电磁暂态仿真算法及初始化方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2020.
YE Xiaohui. Research on the algorithm and initialization method of full electromagnetic transient simulation of power system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020(in Chinese).
- [22] 颜湘武, 崔森, 孙雪薇, 等. 双馈风力发电机组全运行工况与快速启动电磁暂态建模[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1250-1257.
YAN Xiangwu, CUI Sen, SUN Xuewei, et al. Transient modeling of doubly-fed induction generator based wind turbine on full operation and rapid starting condition[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1250-1257(in Chinese).
- [23] JIANG Jingya, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Analysis of harmonic resonance characteristics in grid-connected LCL virtual synchronous generator[J]. Sustainability, 2021, 13(8): 4261.
- [24] 刘文焯, 侯俊贤, 汤涌, 等. 考虑不对称故障的机电暂态-电磁暂态混合仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 8-15.
LIU Wenzhuo, HOU Junxian, TANG Yong, et al. Electromechanical transient/electromagnetic transient hybrid simulation method considering asymmetric faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 8-15(in Chinese).
- [25] 连攀杰, 庞博涵, 刘文焯, 等. 新型可控电网换相换流器故障特性及控制优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 679-690.
LIAN Panjie, PANG Bohan, LIU Wenzhuo, et al. Research on fault characteristics and control optimization of novel controllable line commutated converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 679-690 (in Chinese).
- [26] WANG Puyu, ZHANG Xiaoping, COVENTRY P F, et al. Start-up control of an offshore integrated mmc multi-terminal HVDC system with reduced DC voltage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2740-2751.
- [27] 吴蒙. 含大规模风电接入的柔性直流电网启动控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
WU Meng. Research on the start control strategy of VSC-based DC grid with large-scale wind power[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing)2017(in Chinese).
- [28] 陈新琪, 顾益磊, 裘鹏, 等. 大规模交直流系统电磁暂态仿真关键技术[J]. 中国电力, 45(12): 76-80.
CHEN Xinqi, GU Yilei, QIU Peng, et al. Key techniques for electromagnetic transient simulation of large-scale AC/DC power system[J]. Electric Power, 45(12): 76-80(in Chinese).
- [29] 程改红, 陆韶琦, 邵冲, 等. 大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1919-1926.
CHENG Gaihong, LU Shaoqi, SHAO Chong, et al. A high efficiency modeling method for electromagnetic transient simulation of large scale AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1919-1926(in Chinese).

附录 A



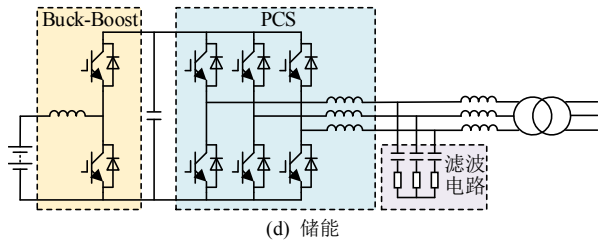


图 A1 新能源机组的拓扑结构

Fig. A1 The topology structure of new energy equipment

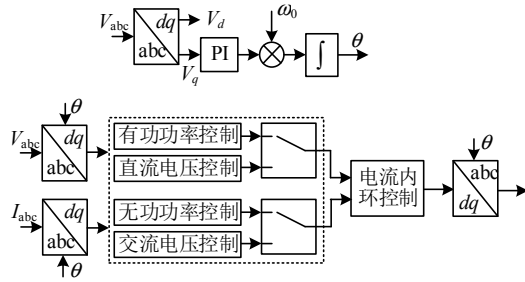


图 A2 跟网型控制的结构图

Fig. A2 Structural diagram of grid following control

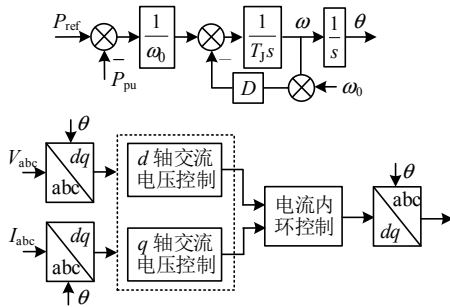


图 A3 基于虚拟同步策略的构网型控制的结构图

Fig. A3 Structure diagram of Grid Forming control based on virtual synchronization strategy

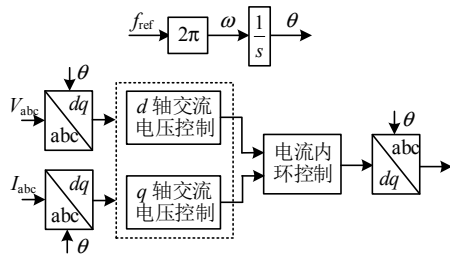


图 A4 无源型控制的结构图

Fig. A4 Structural diagram of islanded control

表 A1 新能源场站的电气参数

Table A1 Electrical parameters of new energy stations

参数	数值
230 kV 电缆长度/km	2×3
35 kV 电缆长度/km	2×9
三相三绕组变压器容量/MVA	100.0
三相三绕组变压器变比	230/35/35
三相三绕组变压器电抗/%	0.011/0.013 3/0.013 3
风机侧变压器容量/MVA	100
风机侧变压器变比	36.75/0.69
风机侧变压器电抗/%	8.715

表 A2 交流电网仿真规模

Table A2 Simulation scale of AC power grid

交流电网编号	设备类型	设备数量/台
1	交流同步机	0
	新能源	40
	静态负荷	0
2	交流同步机	17
	新能源	14
	静态负荷	12
3	交流同步机	22
	新能源	9
	静态负荷	8
4	交流同步机	0
	新能源	0
	静态负荷	7

表 A3 多端柔直的电气参数和控制模式

Table A3 Electrical parameters and control mode of multi-HVDC

换流站编号	电气设备参数	数值
S1	直流电压/kV	800
	额定容量/MW	2 000
	单桥臂子模块数量/个	244
	子模块电容/mF	15
	桥臂电感/H	0.025
	换流变短路阻抗/%	18
	控制模式	无源型
S2	直流电压/kV	800
	额定容量/MW	4 000
	单桥臂子模块数量/个	244
	子模块电容/mF	30
	桥臂电感/H	0.075
	换流变短路阻抗/%	18
	控制模式	构网型
S3	直流电压/kV	800
	额定容量/MW	4 000
	单桥臂子模块数量/个	244
	子模块电容/mF	30
	桥臂电感/H	0.075
	换流变短路阻抗/%	18
	控制模式	跟网型(定直流电压、定无功功率)
S4	直流电压/kV	800
	额定容量/MW	2 000
	单桥臂子模块数量/个	244
	子模块电容/mF	15
	桥臂电感/H	0.025
	换流变短路阻抗/%	18
	控制模式	无源型

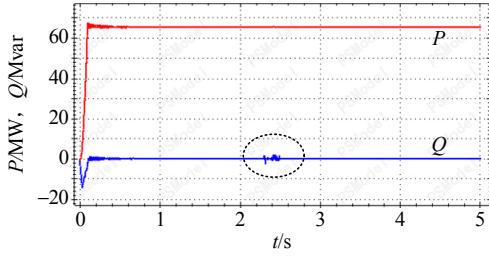


图 A5 电网 1 中新能源的初始化波形

Fig. A5 The initialization waveform of new energy in grid 1

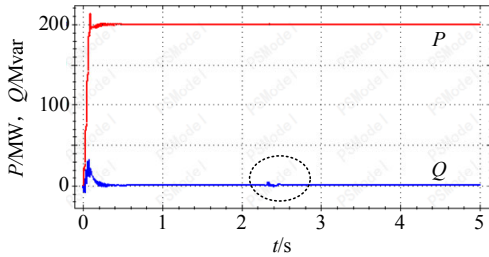


图 A6 电网 2 中新能源的初始化波形

Fig. A6 The initialization waveform of new energy in grid 2

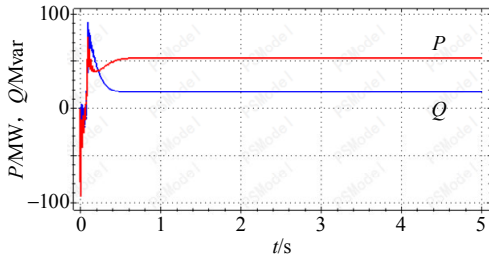


图 A7 电网 2 中马达的初始化波形

Fig. A7 The initialization waveform of multi VSC-HVDC

表 A4 基于不同场景的仿真规模和初始化精度统计

Table A4 Simulation scale and initialization accuracy based on different scenarios

交流电网	设备类型	设备数量/台	初始化精度
西北清洁能源经柔直送出	交流同步机	981	0.62%
	新能源	3424	0.08%
	马达(动态负荷)	881	0.20%
	静态负荷	1218	0.10%
	柔直换流站	2	0.01%
西南清洁能源经柔直送出	交流同步机	363	0.54%
	新能源	172	0.05%
	马达(动态负荷)	392	0.38%
	静态负荷	477	0.76 MW
	柔直换流站	4	0.91%
省内柔直互联	交流同步机	294	0.87%
	新能源	170	0.02%
	马达(动态负荷)	397	0.90%
	静态负荷	1493	0.12%
	柔直换流站	4	0.04%
孤岛联网供电	交流同步机	294	0.87%
	新能源	701	0.02%
	马达(动态负荷)	22	0.80%
	静态负荷	22	0.07%
	柔直换流站	3	0.10%



连攀杰

在线出版日期: 2024-10-10。

收稿日期: 2024-04-23。

作者简介:

连攀杰(1994), 男, 博士, 研究方向为高压直流输电、电磁暂态仿真技术, lianpanjie@epri.sgcc.com.cn;

刘文焯(1972), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真与分析技术研究、软件开发, liuwzh@epri.ac.cn;

*通信作者: 孙华东(1975), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, sunhd@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 李泽荣)