

中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 新型电力系统标准算例(3): 电压稳定 CSEE-VS
作者: 赵兵, 徐式蕴, 兰天楷, 孙华东
网络首发日期: 2023-10-16
引用格式: 赵兵, 徐式蕴, 兰天楷, 孙华东. 新型电力系统标准算例(3): 电压稳定 CSEE-VS[J/OL]. 中国电机工程学报.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20231012.1452.008>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

新型电力系统标准算例(3)：电压稳定 CSEE-VS

赵兵，徐式蕴，兰天楷，孙华东*

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

Benchmark for AC-DC Hybrid System with High Penetration of Renewables(3): Voltage Stability Benchmark CSEE-VS

ZHAO Bing, XU Shiyun, LAN Tiankai, SUN Huadong*

(National Key Laboratory of Grid Security (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Modern power systems are developing as AC-DC hybrid power systems with high penetration of renewables. Nature of voltage stability of the system is changing profoundly, and has been extensively studied. Existing studies adopt various test system in simulations and case study. Authenticity and rationality of the test systems are occasionally overlooked. On the other hand, it is hard to compare the studies in different literatures. In view of the above, this paper designs a benchmark for voltage stability study, CSEE-VS, which is based on the practical engineering of China. It addresses voltage collapse and continuous low-voltage after AC fault, which are typical scenarios of voltage instability. Penetration of renewables in the system is above 50%. Critical factors that influence voltage stability are studied for the benchmark, including penetration of renewables, power level of HVDC, configuration of synchronous condenser, etc. The study has shown that the benchmark is capable to reflect typical performance in voltage instability, and reflect several novel performances in system with high penetration of renewables. It can serve as an effective testbed in related fields.

KEY WORDS: Voltage stability; renewable energy; AC/DC hybrid power grid; benchmark

摘要:现代电力系统逐渐发展为含高比例新能源的交直流混联系统，其电压稳定是值得研究的重要问题。目前在世界范围内的相关文献已有很多，但大多使用不同算例开展研究和测试，对算例系统的真实性、合理性关注不足，不同研究成果之间难以横向比较。论文基于我国的实际工程情况设计了1个标准算例，新能源渗透率在50%以上，可用于分析新型电力系统中故障后的电压崩溃、持续低电压等电压稳定问题。同时，论文分析并展示了算例系统中电压稳定的关键影响因素，包括直流功率水平、新能源水平、调相机配置、薄弱区域负荷水平等。结果表明，该算例既

能较好反映电力系统的常规电压稳定特性，也反映了一些高比例新能源场景下的新型电压稳定特性，可作为高比例新能源场景下直流受端电网电压稳定分析基础平台，节省科研人员在算例设计方面的精力投入，有利于不同研究成果的横向比较。

关键词: 电压稳定；新能源；交直流混联；标准算例

0 引言

在“碳达峰、碳中和”的战略指引下，我国新型电力系统建设不断开展，新能源占比持续升高，形成含高比例新能源的交直流混联格局^[1-3]。新型电力系统的电压稳定性逐步减弱，且体现出新的特性，成为学术界和工业界关注的重点之一。目前对于新型电力系统的电压稳定问题尚没有广泛使用的标准算例，给研究人员的工作带来阻碍。

在过去的研究中，常规电力系统的电压稳定问题一般使用 WECC-9 节点系统^[4]或 IEEE-39 节点系统^[5]作为标准算例，与直流相关的电压稳定问题一般使用 CIGRE HVDC Benchmark^[6]作为标准算例。随着交直流混联电网及新能源的发展，这两个标准算例都逐渐不能满足研究需要。其中，WECC-9 和 IEEE-39 系统是纯交流系统，不含有任何电力电子设备；CIGRE HVDC Benchmark 是专门研究单回直流输电的算例，系统过于简单，不能反映多回直流或交直流系统间、直流与新能源间的相互作用。

在研究高比例新能源接入的交直流混联电网时，一些文献在 WECC-9 等经典算例基础上，按照研究需求接入直流输电或新能源发电设备^[7]；还有一些文献对 CIGRE HVDC Benchmark 做出适当改进，形成多馈入直流系统^[8]。这些算例结

合了具体研究需要,虽然能够反映电压稳定的一些关键问题,但算例系统的真实性、合理性有时难以保证。CIGRE 曾提出过交直流混联电网算例^[9],但该算例并不是基于实际电力系统设计而成,且公开的数据不够全面,被使用的频率不高^[10]。除此之外,许多文献针对实际电力系统中的问题开展研究,所使用的算例为实际系统的真实运行场景^{[11]~[13]}。但这些算例的详细数据一般不能全部公开,与之相关的研究成果也难以在更具一般性的运行场景下得到进一步的分析与验证。

总体来说,目前在高比例新能源接入的交直流混联电网电压稳定方面,尚没有一个得到广泛使用的标准算例。相关研究缺乏统一的分析与验证平台,这增加了研究人员在算例设计方面的精力投入,且使得不同的研究成果难以横向比较,对学科发展产生不利影响。

本文针对高比例新能源场景下的交直流混联电网暂态电压稳定问题,基于我国的实际工程情况,设计了可用于研究和测试的机电暂态标准算例 CSEE-VS(Chinese Society for Electrical Engineering - Voltage Stability)。算例的新能源渗透率超过 50%,可以反映系统故障后电压崩溃、持续低电压等典型失稳特性以及部分新型失稳特性。算例的总节点数为 66,其中 500kV 节点数为 20。算例着重刻画了 500kV 主网以及直流逆变站、新能源场站附近 0.4kV~220kV 的交流升压网络等,兼顾了建模精度和仿真效率,可以为相关研究人员提供便利。

1 电压稳定的定义和机理

电压稳定是指电力系统受到小扰动或大扰动后,系统电压能够保持或恢复到允许的范围内,不发生电压崩溃的能力^[14]。

1.1 常规电力系统的电压稳定机理

在常规电力系统的暂态仿真计算中,电压失稳一般包括“崩溃”和“持续低电压”两种类型^[15]。其中,持续低电压将引发负荷脱扣、继电保护动作等暂态仿真未详细考虑的因素,最终导致电压崩溃或导致其他形式的系统失稳(频率稳定、功角稳定等)。《电力系统电压稳定评价导则》中规定,故障后负荷母线应在 10s 内恢复到 0.8p.u. 以上^[16]。

使用图 1 所示的“单机-单负荷”等效模型,可以简明地分析常规电力系统的电压特性^[17]。模

型中的受端电压 V_R 、负荷功率 P_R 及电流 I 间的关系如式(1)-(3)所示。

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \times \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \times E_S \quad (1)$$

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \times \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \times \cos\varphi \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \times \frac{E_S}{Z_{LN}} \quad (3)$$

式中,

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + 2 \times \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \times \cos(\theta - \varphi) \quad (4)$$

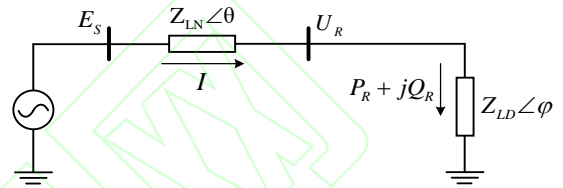


图 1 单机-单负荷等效模型

Fig. 1 Equivalent system for voltage analysis

绘制出受端负荷的电压、电流及功率随负荷阻抗变化的特性,如图 2 所示。图中对负荷的功率、电压、电流、阻抗等电气量做了规格化处理, I_{SC} 表示短路电流, P_{max} 表示功率最大值。随负荷阻抗减小,受端电压随之降低,负荷功率首先增加,然后减小。当线路压降的幅值等于 V_R 时,即

$$Z_{LD}/Z_{LN} = 1 \quad (5)$$

时,系统的传输功率达到最大。此时称系统运行在电压稳定极限。

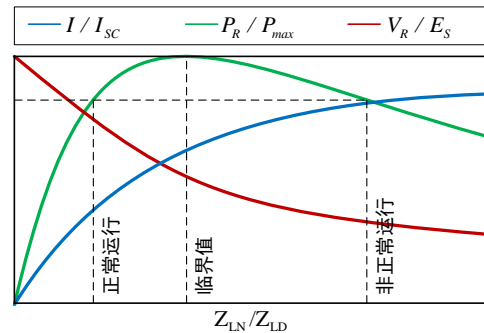


图 2 单机-单负荷模型电气特性

Fig. 2 Features of the equivalent system

P-V 曲线是分析系统功率极限和稳定平衡点的基本工具之一。图 3 给出了不同负荷功率因数下的系统 P-V 特性,其中鼻型点是最大负荷水平对应的运行点,其对应的功率为 P_{max} 。当负荷水平超过 P_{max} 时,系统将发生电压崩溃^{[18]~[19]}。当负

荷水平接近 P_{max} 时，一般会导致持续低电压。

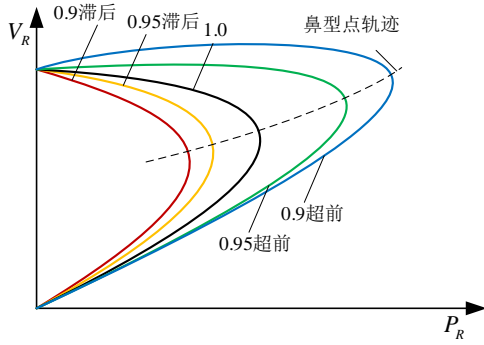


图3 常规电力系统的 P-V 曲线

Fig. 3 P-V curve of power systems

1.2 直流受端系统的电压稳定机理

在直流受端系统中，直流逆变器的换流过程将消耗大量无功功率，使系统的电压稳定特性发生较大变化，但基于 P-V 曲线的静态分析方法依然有效。绘制出不同短路比下直流功率 P_{DC} 与公共耦合点电压 V_{PCC} 间的关系，如图4所示。当直流功率超过“鼻型点”时，系统失稳。

在直流受端系统的电压稳定分析中，还应计及换相失败、低压限流等直流输电的特殊性质[21]-[23]。

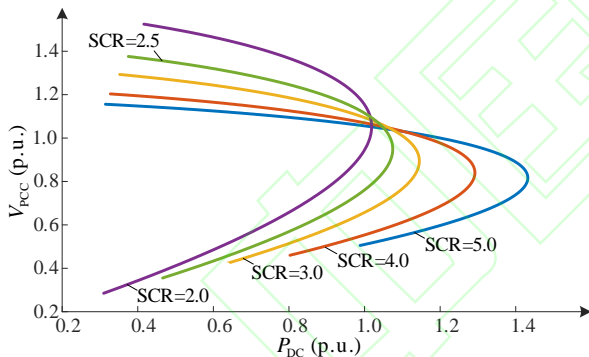


图4 直流受端系统的 P-V 曲线

Fig. 4 P-V curve of HVDC-infeed system

1.3 高比例新能源电力系统的电压稳定特点

目前对高比例新能源电力系统的电压稳定机理认知尚不够全面，但常规系统的2种电压失稳形式仍然存在，同样可以使用 P-V 曲线做初步分析。在研究暂态电压稳定问题时，还需要考虑新能源的低电压穿越和脱网等特性。在机电暂态仿真中，一种典型的新能源穿越特性是

$$I_p = K_{p1}V_t + K_{p2}I_{p0} + I_{pset} \quad (6)$$

$$I_Q = K_{Q1}(V_L - V_t) + I_{Qset} \quad (7)$$

式中， I_p 表示新能源低电压穿越期间的有功电流

指令， I_Q 表示新能源低电压穿越期间的无功电流指令， I_{p0} 表示新能源进入低电压穿越前的有功电流，其他变量为新能源的控制参数。

由于新能源设备的种类多样，它们的穿越特性也各不相同。除了(6)-(7)所给出的穿越期间指定电流控制之外，也有一些新能源在穿越期间是指定功率控制。此外，部分新能源在穿越结束后还会经过爬坡过程，缓慢恢复到穿越前的运行状态。

本算例的仿真模型是相对详细的机电暂态模型，针对不同的新能源设备，还考虑了光伏的直流侧电压动态、光伏电池特性、双馈风机的转子动态、撬棒动作特性等，更具体的模型细节可参考 BPA、PSASP 等机电暂态仿真软件的说明书。

在暂态过程中，受新能源接入比例、系统无功补偿配置等因素影响，电压失稳的具体过程也会不同。例如，在持续低电压时，一些新能源可能在负荷脱扣前发生脱网；一些新能源可能在故障后的一段时间内反复进入、退出低电压穿越状态；一些区域的静态无功补偿容量大于常规电力系统，使电压波动相对更为剧烈。

在本文所提算例的基础上，适当配置运行方式和新能源控制策略后，可以仿真复现上述电压失稳过程的新特性并加以分析。由于目前学界对这些现象的认知尚不充分、在实际工程中对这些现象的报道相对不多，本算例所设计的基础运行方式并未着力凸显相关现象。

2 CSEE-VS 算例概况

2.1 系统概况

基于我国某地电力系统的实际情况，构建高比例新能源接入的常规直流受端电压稳定算例如图5所示。系统包含66个不同电压等级的三相交流节点，刻画了交流主网架及新能源场站附近的电网结构。系统的主网结构如图1所示，节点概况如表1所示。

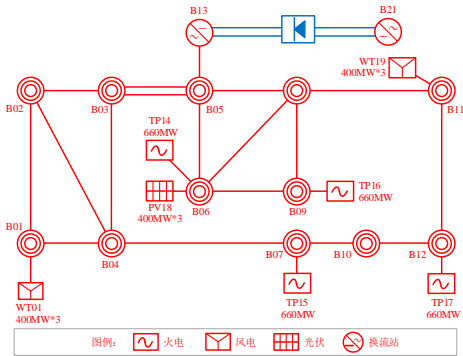


图 5 CSEE-VS 系统结构

Fig. 5 Structure of CSEE-VS

表 1 系统节点概况

Table 1 Overview of nodes

电压等级	节点数量	说明
500kV	20	交流主网架
220kV	18	新能源场站内节点, 负荷节点
220kV 以下	28	新能源场站、换流站内节点, 同步机及电容器并网节点
合计	66	总节点数中不包含三绕组变压器的虚拟中间节点

2.2 交流线路及变压器概况

系统包含 500kV 交流线路 24 条, 220kV 交流线路 12 条, 两绕组变压器 32 台, 三绕组变压器 15 台。相关参数见附录表 A1-A3。

2.3 电源及直流输电概况

系统包含同步发电机 4 台, 新能源场站 3 个, $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路一回, 概况如表 2 所示。在新能源场站中, 共包含倍乘等值的直驱风电集群 4 个, 倍乘等值的双馈风电集群 2 个, 等值光伏集群 3 个。所有新能源机组通过 0.4kV 或 0.69kV 接入, 并逐级升压至主网, 其动态特性参照我国相关标准所推荐的机电暂态模型建模 [20]-[21]。同步机和新能源参数见附录表 A4-A5。算例中的直流模型考虑了触发角控制、低压限流控制、换相失败预测控制、过负荷能力等。模型考虑的动态特性及影响因素与实际直流工程的机电暂态模型基本一致, 适用于机电暂态仿真分析, 并能在一定程度上反映电磁暂态的失稳风险。

表 2 电源及直流输电概况

Table 2 Overview of power sources and HVDC

	火电	光伏	风电	直流输电
额定容量/MW	660*4	400*3	400*6	5000

2.4 负荷及静态无功补偿概况

系统总有功负荷 4905MW, 无功负荷 1647Mvar, 在全网的分布相对均匀, 没有显著的负荷中心。负荷的动态模型为 30%感应电机+70%恒阻抗负荷。所有负荷均连接在 220kV 母线上, 通过三绕组变压器与 500kV 母线相连。系统的主要无功补偿方式是并联电容器 (在持续低电压场景中额外增加了同步调相机)。负荷及相关静态无功补偿的容量见附录表 A6。在未来的高比例新能源场景下, 同步电源减少将导致系统的无功源减少, 无功补偿的方式可能发生变化, 可以由算例的使用者根据需要自行配置, 包括但不限于调相机、静止无功补偿器、构网型储能设备等。

3 电压崩溃场景

3.1 场景构建

电压崩溃场景的运行方式称为基本方式 VC (Voltage Collapse)。在附录所给出的设备参数及负荷水平下, 系统的开机方式和新能源、直流功率水平如表 3 所示。系统中的火电总出力 1553MW, 新能源总出力 1800MW, 直流功率 1600MW。新能源出力占总电源的比例为 53.7%。

表 3 电压崩溃场景的运行方式

Table 3 Operation scenario of voltage collapse

	火电			光伏		风电		直流
接入节点	B14	B15	B16	B17	B18	B01	B19	B13
出力/MW	453	400	300	400	600	600	600	1600

在节点 B03 至 B05 间的双回线路中, 一回线路在 $t=1.00\text{s}$ 时发生三相永久性短路, $t=1.09\text{s}$ 时故障线路的 B03 侧断路器跳开, $t=1.10\text{s}$ 时故障线路的 B05 侧断路器跳开, 另一回并联线路被同时切除。

故障后, 直流换流器出现异常振荡, 全网所有母线电压始终处于低位。一段时间后, 直流闭锁、新能源脱网。系统的电压特性如图 6 所示。

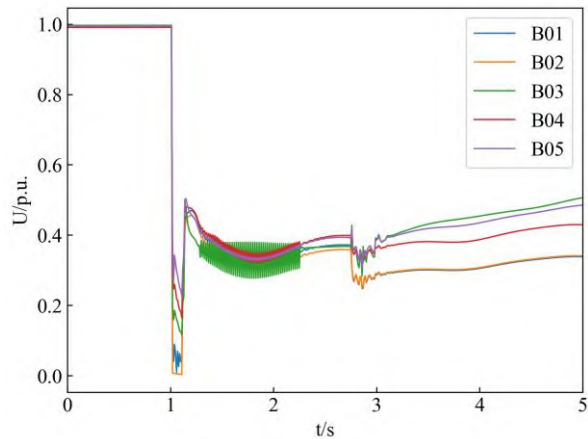


图 6 故障后电压崩溃

Fig. 6 Post-fault voltage collapse

3.2 敏感性分析

在高比例新能源的交直流混联场景中，电压稳定性受直流功率水平、新能源渗透率（同步电源占比）、调相机配置等多因素影响。本小节通过改变以上 3 个因素，展示并分析不同运行方式下算例系统的电压崩溃特性。

3.2.1 直流功率水平

在基本运行方式 VC 下，降低直流输电的功率水平并调整无功补偿配置，对应增加受端系统的火电或新能源出力水平，形成 2 套对比运行方式如表 4 所示。

设置与 3.1 节相同的 N-2 故障，观察不同方式下的直流单极功率响应如图 7 所示，观察节点 B01 的电压波动特性如图 8 所示。仿真结果显示，当直流功率水平降低后，其自身的稳定性有显著提高，从闭锁变为连续换相失败、再变为降功率运行。这对系统的电压水平也有一定影响，但很难使系统从电压崩溃变为稳定。

表 4 不同方式下的直流功率水平

Table 4 HVDC power level in different scenarios			
	基本方式 VC	对比方式 1	对比方式 2
直流功率水平/MW	1600	1200	800

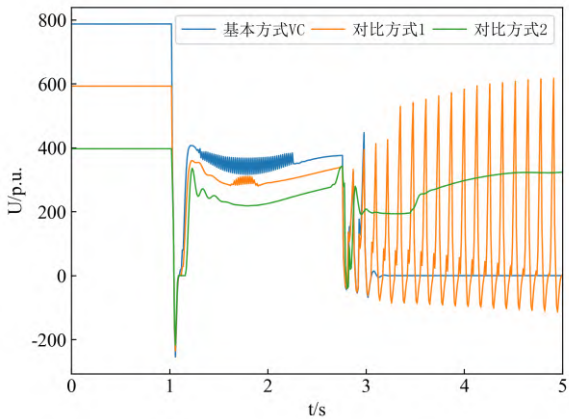


图 7 不同功率水平下的直流功率响应特性

Fig. 7 HVDC power response under different power level

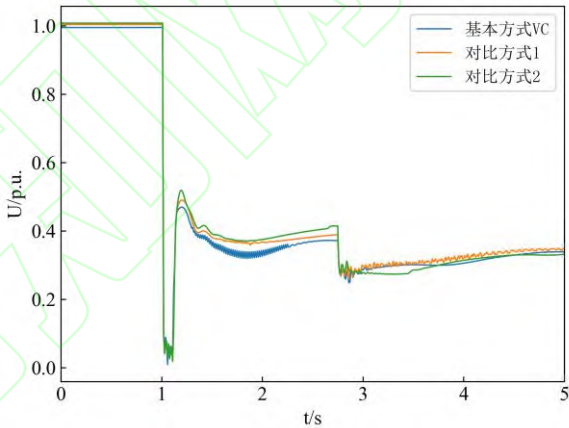


图 8 直流功率水平对电压崩溃场景的影响

Fig. 8 Influence of HVDC power level on voltage collapse scenario

3.2.2 新能源渗透率（同步电源占比）

在基本运行方式 VC 下，依次将 B19、B01 节点附近的部分新能源出力替换为等量的火电机组，形成 2 套对比运行方式如表 5 所示。

设置与 3.1 节相同的 N-2 故障，观察节点 B05、B01 的电压波动特性如图 9、图 10 所示。结果表明，同步发电机占比增加后，系统的电压支撑能力变强，故障后的电压特性由全网电压崩溃变为局部电压崩溃。需要指出，虽然对比方式 4 中部分节点的电

表 5 不同方式下的新能源功率水平

Table 5 Renewable power level in different scenarios			
	基本方式 VC	对比方式 3	对比方式 4
新能源出力/MW	1800	1500	1200

新能源功率占比 53.6% 44.7% 35.8%

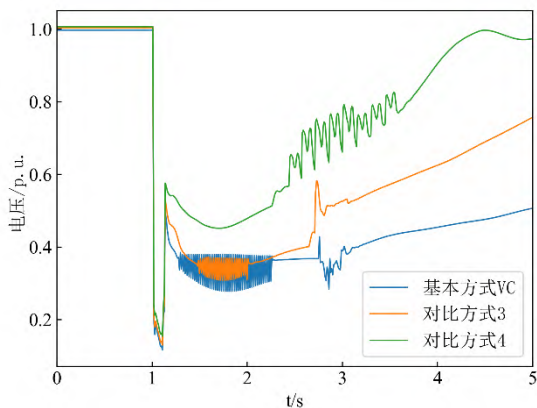


图9 新能源渗透率水平对电压崩溃场景的影响(B05 母线电压)

Fig. 9 Influence of renewable penetration in voltage collapse scenario (voltage of B05)

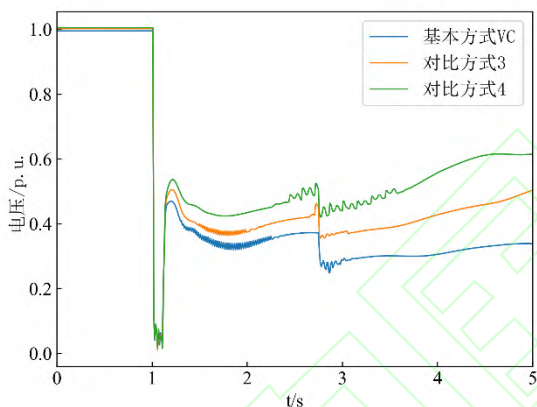


图10 新能源渗透率水平对电压崩溃场景的影响(B01 母线电压)

Fig. 10 Influence of renewable penetration in voltage collapse scenario (voltage of B01)

压可以恢复到较高水平,但系统此时还经历了低电压引发的高频等问题,并不是稳定的电力系统。

3.2.3 调相机配置

到调相机可以起到很好的动态电压支撑作用,在未来的高比例新能源场景中,可作为重要的无功补偿设备。在直流受端母线 B05 配置一台同步调相机,形成对比方式 5。比较故障后母线 B05、B01 的电压水平,分别如图 11、图 12 所示。结果表明,调相机能够较显著地提升系统电压稳定性。

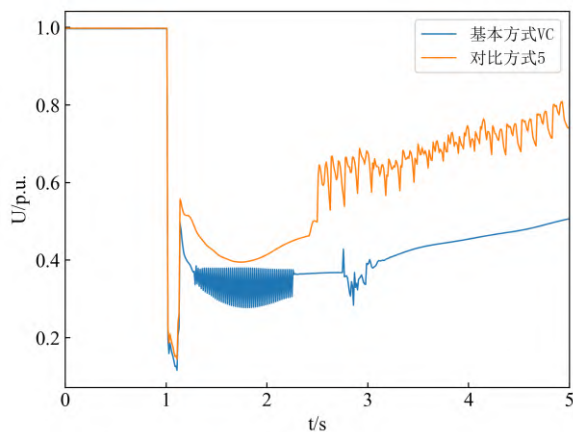


图11 调相机对电压崩溃场景的影响(母线 B05)

Fig. 11 Influence of renewable penetration in voltage collapse scenario (bus B05)

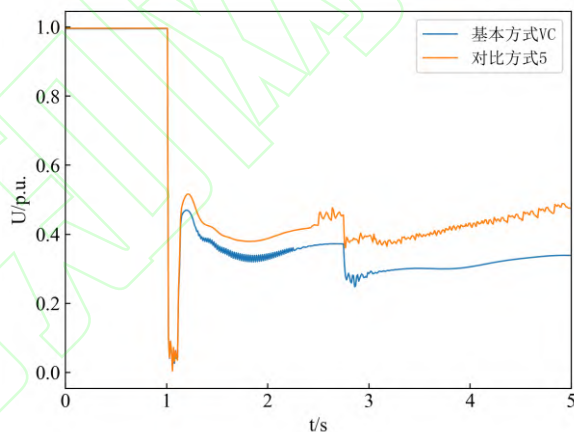


图12 调相机对电压崩溃场景的影响(母线 B01)

Fig. 12 Influence of renewable penetration in voltage collapse scenario (bus B01)

4 持续低电压场景

4.1 场景构建

持续低电压场景的运行方式称为基本方式 CLV (Continuous Low Voltage)。基于附录所给出的设备参数及负荷水平下,在直流受端附近的 B05 母线上配置 2 台调相机,形成基本方式 CLV。和基本方式 VC 相比,这一运行方式具备更好的电压稳定性,也更加贴近高比例新能源系统的实际运行工况。

当系统发生与 3.1 节相同的 N-2 故障时,没有发生直流闭锁,但母线 B01、B02、B03、B04 附近成为受端薄弱区域,出现持续低电压现象,伴随部分新能源脱网。系统部分节点的电压波形如图 13 所示。根据《电力系统电压稳定评价导则》的推荐判据^[16],此时系统电压失稳。

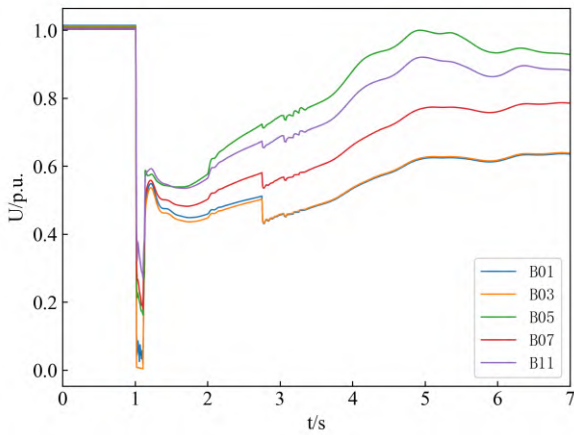


图 13 故障后部分母线持续低电压

Fig. 13 Post-fault continuous low voltage of nodes

4.2 敏感性分析

本小节将针对基本方式 SLV，分析直流功率水平、新能源渗透率（同步电源占比）、薄弱区域负荷水平等对电压稳定的影响。通过改变以上 3 个因素，展示并分析不同运行方式下算例系统的电压特性。

4.2.1 直流功率水平

在基本运行方式 CLV 下，降低直流输电的功率水平，对应增加的新能源及火电出力水平，形成 2 套对比运行方式如表 6 所示。

设置与 3.1 节相同的 N-2 故障，观察节点 B05 的电压波动特性如图 14 所示。仿真结果显示，直流功率水平降低能够较好地促进受端近区的电压恢复。

表 6 不同方式下的直流功率水平

Table 6 HVDC power level in different scenarios

	基本方式 CLV	对比方式 6	对比方式 7
直流功率水平/MW	1600	1400	1200

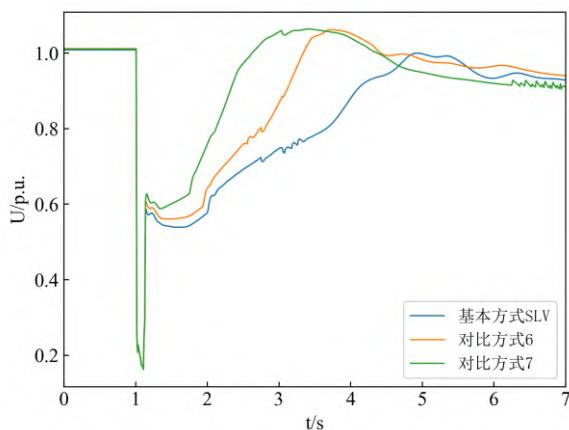


图 14 直流功率水平对持续低电压场景的影响

Fig. 14 Influence of HVDC power level in continuous

low voltage scenario

4.2.2 新能源渗透率（同步电源占比）

在基本运行方式 CLV 下，将部分新能源出力替换为等量的火电机组，形成 2 套对比运行方式如表 7 所示。

在 N-2 故障下，观察节点 B01 的电压波动特性如图 15 所示。随新能源渗透率降低，系统的电压稳定水平显著提高。

表 7 不同方式下的新能源功率水平

Table 7 Renewable power level in different scenarios

	基本方式 CLV	对比方式 8	对比方式 9
新能源功率/MW	1800	1500	1200
新能源功率渗透率	50.2%	44.8%	35.8%

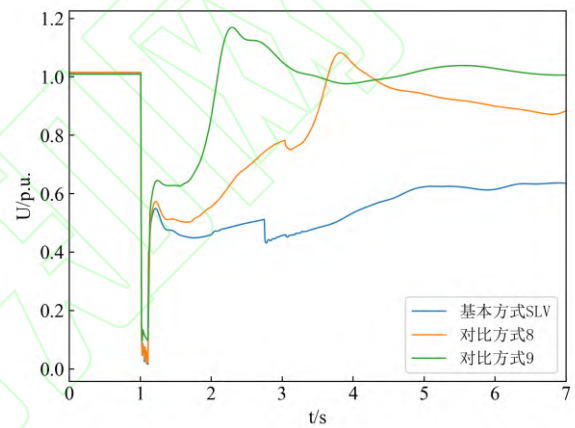


图 15 新能源渗透率对持续低电压场景的影响

Fig. 15 Influence of renewable penetration in

continuous low voltage scenario

4.2.3 薄弱区域的负荷水平

降低受端薄弱区域 B04 附近的负荷水平，对应等量地增加送端区域负荷水平，并调整无功补偿保证各节点电压基本不变，形成 2 套对比方式。这些方式的有功负荷水平如表 8 所示。

表 8 不同方式下的薄弱区域负荷水平（MW）

Table 8 Load level in weak area in different scenarios

	B01	B02	B03	B04	B07
基本方式 SLV	356	408	339	452	457
对比方式 10	356	308	339	352	357
对比方式 11	256	208	239	252	357

在 N-2 故障下，观察节点 B01、B05 的电压波动特性如图 16、图 17 所示。负荷水平对不同区域的电压稳定特性均有显著影响。

另一方面，算例系统中的同步机占比较低且未考虑相关的安控措施，使系统更容易受新能源

脱网、发电机功角摆动等的影响,其送端区域、受端区域的响应特性有所不同,并伴随有高频、低频、过电压等复杂问题。算例的使用者可根据具体情况加以分析或设计对应的控制措施。

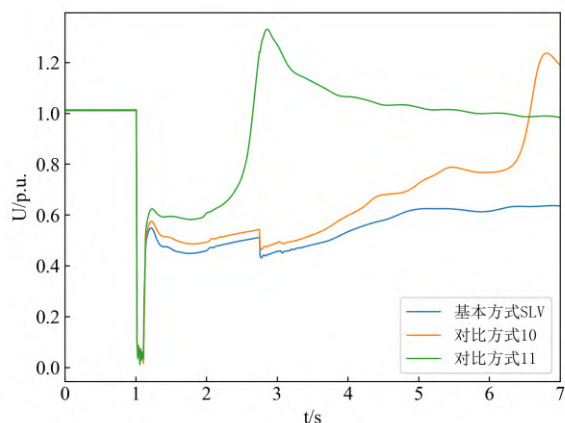


图 16 薄弱区域负荷水平对持续低电压场景的影响 (B01 母线电压)

Fig. 16 Influence of renewable penetration in continuous low voltage scenario (voltage of B01)

5 高比例新能源场景下的新型电压特性

在第 3、第 4 节的仿真结果中,算例的大部分特性变化规律与常规电力系统相似,但也出现了一些高比例新能源场景下的特有现象。在算例中,系统电压与新能源的控制策略、同步机功角摆动等多因素耦合,形成特殊的交互作用。例如,基本方式 SLV 中的电压恢复过程受新能源脱网影响。新能源脱网后,受端有功电源减少,网络负载加重,使正在恢复的系统电压再次下降。又如,对比方式 11 中的电压特性受同步机功角差等因素影响,当系统中各同步机间的功角差达到最小值时,系统电压接近峰值、体现出过电压趋势。又如,对比方式 7 中,系统的 500kV 母线电压稳定在 0.92p.u.左右时,部分新能源反复进入、退出低电压穿越,导致电压和功率振荡等。

上述新型电压特性的详细机理有赖于进一步的研究。本节以新能源的反复穿越现象为例,展示与之相关的具体动态过程。在对比方式 7 中,系统处于电压稳定的临界水平。故障后电压缓慢恢复至新能源穿越门槛电压附近,使新能源从穿越控制变为正常控制。新能源的控制切换使其出力发生变化,机端电压降低,再次进入穿越状态。这一过程反复发生,使新能源反复低电压穿越,对电网造成功率冲击,并引发电压振荡。风电场

WT-19 中的机组机端电压和功率特性如图 18-19 所示,体现了上述振荡过程。

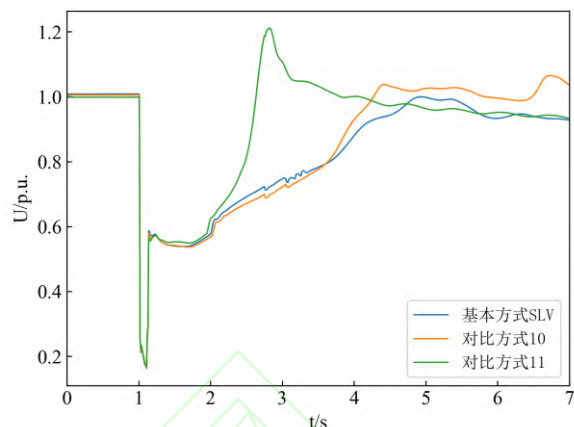


图 17 薄弱区域负荷水平对持续低电压场景的影响 (B05 母线电压)

Fig. 17 Influence of renewable penetration in continuous low voltage scenario (voltage of B05)

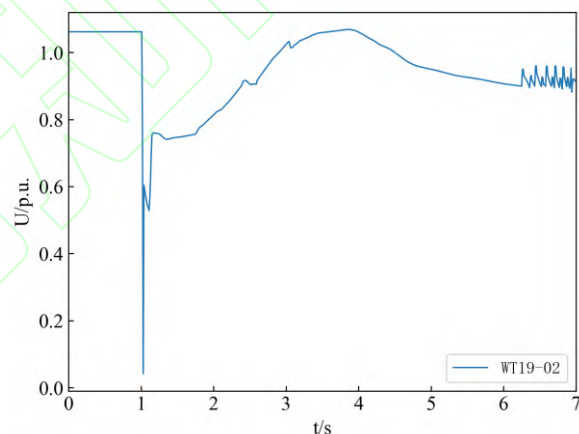


图 18 受穿越影响的风机机端电压振荡

Fig. 18 Terminal voltage oscillation of wind turbine induced by LVRT

在实际运行中,一些风电机组会预设最大低电压穿越次数。如果短期内低电压穿越次数超过设定值,就会自动切机、停止运行或者降低出力。本算例中没有考虑这类特性。

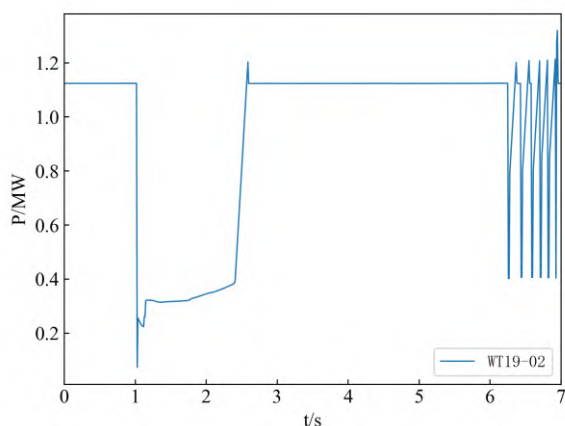


图 19 风机反复低电压穿越造成的有功振荡

Fig. 19 Power oscillation of wind turbine induced by repeated LVRT

6 结论

本文针对高比例新能源交直流混联电网电压稳定研究的算例需求，公开了一套测试算例 CSEE-VS，相关结论如下：

1) 依据实际电网运行情况，构建了适用于机电暂态电压稳定仿真分析的计算算例。算例具备高比例新能源接入的直流受端电网特点，新能源装机占比在 50%以上，符合未来电力系统发展趋势。使用者可以通过调整算例的运行方式和新能源占比，研究不同场景下的电力系统特性。

2) 算例中的新能源、直流等设备模型与实际工程中电网仿真计算所使用的模型基本一致。使用者也可以根据具体需要，使用其他模型。

3) 在不同运行方式下，算例系统将表现出电压崩溃、持续低电压等典型电压失稳现象。论文测试了新能源出力水平、直流输电功率水平、调相机配置、薄弱区域负荷水平等因素对电压稳定特性的影响，为使用者提供参考。

4) 算例系统中可以观察到一些高比例新能源电力系统的新型电压相关特性，包括系统电压与同步机功角、新能源脱网、新能源穿越控制等的耦合动态。目前学界相关现象的认识尚不充分，研究人员可以借助本算例开展进一步分析。

参考文献

[1] 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. Definition and classification of power system security and

stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7809(in Chinese).

- [2] 辛保安, 陈梅, 赵鹏, 等. 碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6919-6931.
Xin Baoan, Chen Mei, Zhao Peng, et al. Research on Coal Power Generation Reduction Path Considering Power Supply Adequacy Constraints Under Carbon Neutrality Target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6931.
- [3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(07): 1893-1904+2205.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CESS, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [4] Challa K K, Gurralla G. Scaled down model of WECC 3-machine 9-bus system with frequency-dependent lines[C]. 2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Perth, Australia, 2019: 1-6.
- [5] Luc Gérin-Lajoie. IEEE PES task force on benchmark systems for stability controls[R]. New York: IEEE PES, 2015.
- [6] Szechtman M, Wess T, Thio C V. A benchmark model for HVDC system studies[C]. International Conference on AC and DC Power Transmission, London, UK, 1991: 374-378.
- [7] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(09): 2745-2756.
Mao Anjia, Ma Jing, Kuai Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(09): 2745-2756(in Chinese).
- [8] Xu Jian, Lan Tiankai, Liao Siyang, et al. A coordinated marginal current control method for LCC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4569-4582.
- [9] Xu Jian, Lan Tiankai, Liao Siyang, et al. An on-line power/voltage stability index for multi-infeed HVDC systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 1094-1104.
- [10] Chodura P, Roald De Graaff, Gibescu, et al. Influence of embedded HVDC transmission on system security and AC network performance[R]. Lund: CIGRE, 2013.
- [11] 郑超, 马世英, 盛灿辉, 等. 以直流逆变站为动态无功源的暂态电压稳定控制[J]. 中国电机工程学报,

- 2014, 34(34): 6141-6149.
- Zheng Chao, Ma Shiyong, Sheng Canhui, et al. Transient voltage stability control based on the HVDC inverter station acting as dynamic reactive source[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6141-6149(in Chinese).
- [12] 周莹坤, 孙华东, 徐式蕴, 等. 提升电网电压支撑强度的调相机优化配置方法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3848-3856.
- Zhou Yingkun, Sun Huadong, Xu Shiyun, et al. Synchronous Condenser Optimized Configuration Scheme for Power Grid Voltage Strength Improvement [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3848-3856(in Chinese).
- [13] 夏成军, 王真, 华夏, 等. 基于电压灵敏度的受端系统电压支撑强度评价指标[J]. 电网技术, 2018, 42(09): 2938-2949.
- Xia Chengjun, Wang Zhen, Hua Xia, et al. A voltage support strength index based on sensitivity for receiving end of HVDC system[J]. Power System Technology, 2018, 42(09): 2938-2949(in Chinese).
- [14] GB 38755-2019 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2019.
- GB 38755-2019 Code on security and stability for power system[S]. Beijing: China State Administration for Market Regulation, China Standardization Administration, 2017. (in Chinese)
- [15] 汤涌. 电力系统电压稳定性分析[M]. 科学出版社, 2011.
- Tang Yong. Voltage stability analysis of power system[M]. Science Press, 2011. (in Chinese)
- [16] GB/T 40615-2021 电力系统电压稳定评价导则[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2021.
- GB/T 40615-2021 Guides of power system voltage stability evaluation [S]. Beijing: China State Administration for Market Regulation, China Standardization Administration, 2021. (in Chinese)
- [17] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 中国电力出版社, 2004.
- Zhou Shuangxi. Power system voltage stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. (in Chinese)
- [18] Van Cutsem T, Vournas C. Voltage stability of electric power systems[M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [19] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. 中国电力出版社, 1994.
- Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. China Electric Power Press, 1994.
- [20] GB/T 36237-2018. 风力发电机组 电气仿真模型[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会, 2018.
- GB/T 36237-2018. Wind turbines — Electrical simulation models [S]. Beijing: China State Administration for Market Regulation, China Standardization Administration, 2017. (in Chinese)
- [21] GB/T 19964-2012. 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会, 2012.
- GB/T 19964-2012. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S]. Beijing: China State Administration for Market Regulation, China Standardization Administration, 2012. (in Chinese)
- [22] 昆德. 电力系统稳定与控制[M]. 中国电力出版社, 2001.
- Kundur. Power System Stability and Control[M]. China Electric Power Press, 2001.
- [23] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 科学出版社, 2010.
- Li Xingyuan. High Voltage Direct Current Transmission System[M]. Chinese Science Publishing & Media Ltd. 2010. (in Chinese)



赵兵

作者简介:

赵兵(1980), 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, E-mail: zhaobing@epri.sgcc.com.cn;

徐式蕴(1985), 女, 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, E-mail: xushiyun@epri.sgcc.com.cn;

兰天楷(1994), 男, 博士, 研究方向为电力系统电压稳定、分布式新能源及负荷建模, Email: lantiankai@epri.sgcc.com.cn;

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

附录

表 A1 线路参数

Table A1 Line parameters

序号	首端节点	末端节点	电阻/pu	电抗/pu	电纳/pu	基准电压/kV	并列回路数
1	B02	B01	0.00042	0.00912	0.00615	525	1
2	B03	B02	0.00052	0.00448	0.00210	525	1
3	B04	B03	0.00089	0.00103	0.00129	525	1
4	B04	B07	0.00076	0.00910	0.00400	525	1
5	B04	B02	0.00097	0.00602	0.00578	525	1
6	B04	B01	0.00037	0.00422	0.00327	525	1
7	B05	B08	0.00028	0.00356	0.00140	525	1
8	B05	B03	0.00050	0.00730	0.00450	525	2
9	B06	B05	0.00027	0.00377	0.00210	525	1
10	B07	B10	0.00081	0.00850	0.00321	525	1
11	B08	B11	0.00040	0.00760	0.00450	525	1
12	B08	B09	0.00019	0.00270	0.00170	525	1
13	B08	B06	0.00019	0.00267	0.00190	525	1
14	B09	B06	0.00040	0.00610	0.00840	525	1
15	B12	B10	0.00090	0.00107	0.00157	525	1
16	B12	B11	0.00090	0.00634	0.00351	525	1
17	B13	B05	0.00010	/	/	525	1
18	B14	B06	0.00012	0.00163	0.00306	525	1
19	B15	B07	0.00009	0.00134	0.00251	525	1
20	B16	B09	0.00012	0.00163	0.00306	525	1
21	B17	B12	0.00010	0.00020	0.00010	525	1
22	B18	B06	0.00030	0.00380	0.01840	525	1
23	B19	B11	0.00070	0.00980	0.01840	525	1
24	B22	B23	0.00186	0.01307	0.02412	230	4
25	B24	B25	0.00186	0.01307	0.02412	230	4
26	B26	B27	0.00186	0.01307	0.02412	230	4

表 A2 两绕组变压器参数

Table A2 Two winding transformer parameters

序号	首端节点	末端节点	额定容量/MVA	漏抗/pu	分接头电压/kV	并联台数
1	B21	DP-01	3000	0.006	525.0/210.4	1
2	B21	DN-01	3000	0.006	525.0/199.4	1
3	B13	DP-02	3000	0.006	525.0/210.4	1
4	B13	DN-02	3000	0.006	525.0/199.4	1
5	WT19-01	B32	450	0.01389	0.69/38.5	1
6	WT19-02	B32	450	0.01389	0.69/38.5	1
7	WT19-03	B32	450	0.01389	0.69/38.5	1
8	B24	B32	300	0.035	230.0/38.5	4

9	WT20-01	B33	450	0.01389	0.69/38.5	1
10	WT20-02	B33	450	0.01389	0.69/38.5	1
11	WT20-03	B33	450	0.01389	0.69/38.5	1
12	B26	B33	300	0.035	230.0/38.5	4
13	PV18-01	B31	300	0.02167	0.4/38.5	2
14	PV18-02	B31	300	0.02167	0.4/38.5	2
15	PV18-03	B31	300	0.02167	0.4/38.5	2
16	B22	B31	300	0.035	230.0/38.5	4
17	TP14-01	B14	750	0.02671	20.0/5250	1
18	TP15-01	B15	750	0.02671	20.0/525.0.	1
19	TP16-01	B16	750	0.03331	20.0/525.0	1
20	TP17-01	B17	750	0.03331	20.0/525.0	1

表 A3 三绕组变压器参数

Table A3 Three winding transformer parameters

序号	变压器名称	连接节点	漏抗 1/pu	漏抗 2/pu	漏抗 3/pu	额定容量/MVA	分接头电压/kV
1	T3-01	B18/B23/B28	0.01637	-0.00190	0.01922	1500/1500/450	500/230/66
2	T3-02	B19/B25/B29	0.01637	-0.00190	0.01922	1500/1500/450	500/230/66
3	T3-03	B01/B27/B30	0.01637	-0.00190	0.01922	1500/1500/450	500/230/66
4	T3-04	B01/B34/B35	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
5	T3-05	B02/B36/B37	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
6	T3-06	B03/B38/B39	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
7	T3-07	B04/B40/B41	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
8	T3-08	B05/B42/B43	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
9	T3-09	B06/B44/B45	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
10	T3-10	B07/B46/B47	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
11	T3-11	B08/B48/B49	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
12	T3-12	B09/B50/B51	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
13	T3-13	B10/B52/B53	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
14	T3-14	B11/B54/B55	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37
15	T3-15	B12/B56/B57	0.01570	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37

表 A4 同步发电机参数

Table A4 Generator parameters

序号	发电机名称	节点类型	接入的主网节点	最大有功/MW	最大无功/Mvar	设定电压/p.u.
1	TP14-01	Slack	B14	660	300	1.0
2	TP15-01	PV	B15	660	300	1.0
3	TP16-01	PV	B16	660	300	1.0
4	TP17-01	PV	B17	660	300	1.0

表 A5 新能源参数

Table A5 Renewable parameters

序号	接入的主网节点	新能源机组名称	额定容量/MW
1	B18	PV18-01	400
2	B18	PV18-02	400
3	B18	PV18-03	400
4	B19	WT19-01	400
5	B19	WT19-02	400
6	B19	WT19-03	400
7	B20	WT20-01	400
8	B20	WT20-02	400
9	B20	WT20-03	400

表 A6 负荷及静态无功补偿容量

Table A6 Loads and static compensations

主网节点	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar	无功补偿容量/Mvar
B01	356	123	160
B02	408	149	160
B03	339	122	160
B04	452	165	160
B05	506	162	160
B06	475	154	150
B07	457	157	180
B08	470	160	180
B09	399	115	150
B10	509	166	180
B11	427	142	160
B12	107	32	60