

潮间带光伏预应力管桩做自然接地体特性研究

邓鹏,周秦,宋兆非,何垒

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘要:为研究潮间带海上光伏利用预应力管桩做自然接地体的接地特性,采用CDEGS仿真软件建立预应力管桩自然接地体的仿真模型,分析了不同海水深度、淤泥层厚度和不同光伏装机规模、桩长对光伏阵列工频接地电阻的影响以及不同桩长、管桩数量和海水深度对冲击接地电阻的影响。经分析,工频接地电阻随海水深度、淤泥层厚度、装机规模的增加而降低且减小幅度逐步变缓并趋于稳定。冲击接地电阻随着支架数量和海水深度的增加而减小,且减小的幅度逐步降低。研究表明潮间带光伏利用预应力管桩做自然接地体具备可行性。

关键词:潮间带光伏;预应力管桩;工频接地电阻;冲击接地电阻

中图分类号:TM 615 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)03-0076-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240314

Research on Characteristics of Prestressed Pipe Pile Used as Natural Grounding Electrode of Offshore Photovoltaic in Intertidal Zone

DENG Peng, ZHOU Qin, SONG Zhaofei, HE Lei

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CPECC, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract:In order to study the grounding characteristics of prestressed pipe pile used as natural grounding electrode of offshore photovoltaic in intertidal zone, a simulation model of prestressed pipe pile used as natural grounding electrode is established by using CDEGS. The impact of different seawater depth and silt layer thickness, different installed capacity and pile length on power frequency earthing resistance of photovoltaic arrays are analyzed as well as the impact of different pile length, number of pipe piles and seawater depth on impulse earthing resistance. According to the analysis, power frequency earthing resistance decreases with the increase of seawater depth, silt layer thickness and installed capacity, and gradually slows down and tends towards stability. While impulse earthing resistance decreases with the increase of the number of supports and seawater depth, and the magnitude of the decrease gradually slows down. The results show that using prestressed pipe pile as natural grounding electrode has the feasibility for offshore photovoltaic in intertidal zone.

Key words: offshore photovoltaic in intertidal zone; prestressed pipe pile; power frequency earthing resistance; impulse earthing resistance

0 引言

随着内陆土地资源的日益稀缺,海上光伏成为新的发展方向之一。对于固定式海上光伏,多在潮间带滩涂场地进行建设,所处环境和陆上光伏有着显著差异,海水腐蚀性使得采用金属接地网的防腐成本很高。由于滩涂场地潮湿的地下环境以及海水的强散流能力,利用数量众多的预应力管桩做自然接地体,是降低固定式光伏项目成本的一个途径。国内个别内陆水上光伏尝试采用预应力管桩做自然

接地体,接地电阻经实测满足小于 $4\ \Omega$ 的要求^[1]。但潮间带滩涂场地涨落潮时海水深度以及淤泥层厚度的变化对接地特性有较大影响。预应力管桩做自然接地体能否满足接地电阻的要求,需要进行系统的分析研究。

下面采用CDEGS仿真软件对潮间带海上光伏预应力管桩做自然接地体的接地特性进行了研究,在探讨预应力管桩、各地层电阻率参数基础上,分析了不同海水深度、淤泥层厚度和不同光伏装机规模、桩长对光伏阵列工频接地电阻的影响,以及不同桩长、管桩数量和海水深度对冲击接地电阻的影响。

1 接地模型构建

分析工频接地电阻以直流侧容量 4 MW 方阵为基本单元构建接地模型。单个方阵 130 组支架,按 13 排 10 列布置。每组支架长 32 m,7 根预应力管桩,桩间距 5 m,支架前后排间距取 9 m。通过导体连接管桩顶部环形铁板形成一个整体网络,网格长 320 m,宽 117 m,单个方阵共计 910 根管桩,方阵模型如图 1 所示。

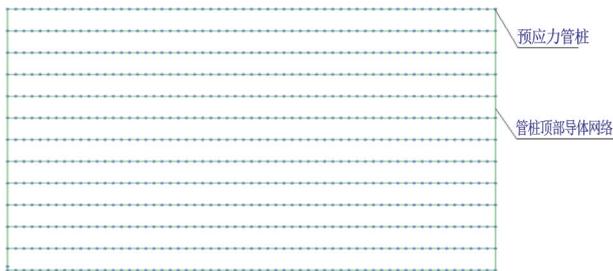


图 1 单方阵接地网模型(俯视)

在通过 CDEGS 进行仿真时,建立多层土壤模型来模拟海水深度、淤泥层厚度的变化,如图 2 所示。其中,管桩顶部及导体连通网络置于空气中,管桩穿透海水、淤泥和砂石层,砂石层的厚度取无限大。接地特性研究包含海水深度为 0 m 的最不利情况。为便于计算,分析时所有管桩按相同水深考虑。

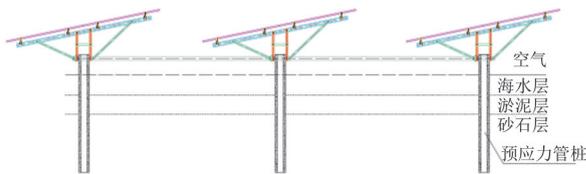


图 2 方阵接地网模型(断面)

分析冲击接地电阻时,考虑到仿真计算的数据处理能力,以支架为基本单元构建模型,注入电流幅值为 10 kA、波形为 2.6/50 μ s 的标准雷电波,利用快速傅里叶变换和快速反傅里叶变换,采用矢量磁位法进行计算。在此基础上研究桩长、管桩数量以及海水深度对冲击接地电阻的影响。

2 影响接地特性的主要参数

2.1 影响接地特性的主要参数

混凝土是典型的多孔介质,当它直接与水接触时毛细吸附作用将使水进入混凝土孔隙,而孔隙中的水由于溶解了一定的可溶性水化产物及杂

质盐,如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NaCl 等,因此富含大量可自由移动的阴阳离子,在外电场作用下,阴阳离子在孔隙溶液中沿着连通的孔隙定向迁移,使得整个混凝土材料在表观看来可视为导体^[2]。国内外大量的研究表明,潮湿环境中的混凝土具有极低的电阻率。根据 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》^[3]附录 J“土壤和水的电阻率参考值”,当海水深度不为 0 m,管桩被浸泡时,预应力管桩电阻率近似值为 40~55 $\Omega \cdot \text{m}$;当海水深度为 0 m,潮间带地表裸露,管桩置于淤泥层和潮湿砂石层时,预应力管桩电阻率近似值为 100~200 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

2.2 海水、淤泥层及砂石层电阻率

海水富含各种离子,具有良好的导电性能,在不同光照、温度及含盐度因素的影响下,其电阻率略有差异,但通常不会高于 5 $\Omega \cdot \text{m}$ 。淤泥层由厚度不等的沉积物组成,电阻率可按 60 $\Omega \cdot \text{m}$ 考虑^[4]。根据 GB/T 50065—2011 附录 J 以及文献[4],砂石层电阻率取 1000~1500 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

2.3 海水深度及管桩参数

潮汐带来海水深度的变化,根据国家海事服务网提供的数据,一天之中有两次涨潮及退潮。考虑到光伏项目可接受的建设成本,海水深度取 0~3 m,桩长范围取 6~14 m。

3 不同因素对工频接地电阻的影响

3.1 海水深度

分析海水深度对工频接地电阻的影响基于单个 4 MW 方阵,管桩桩长取 6 m,桩径取 0.3 m,淤泥层厚度取 0 m,砂石层厚度无限大,电阻率取 1500 $\Omega \cdot \text{m}$ 。当海水深度不为 0 m 时,预应力管桩电阻率取 55 $\Omega \cdot \text{m}$;当海水深度为 0 m 时,预应力管桩电阻率取 200 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

当海水深度为 0 m 时(地表裸露的最不利情况),方阵工频接地电阻为 3.88 Ω ,满足 GB/T 50065—2011 及 GB 50797—2012《光伏发电站设计规范》^[5]对光伏方阵接地电阻小于 4 Ω 的要求。随着海水深度的增加,工频接地电阻逐步减小,当海水深度从 0 m 逐步升高到 0.1 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m 和 1.0 m(即落潮地表裸露到涨潮海水淹没时),工频接地电阻分别为 2.65 Ω 、2.04 Ω 、1.70 Ω 、1.48 Ω 、1.35 Ω 和 1.24 Ω ,降幅分别为 31.7%、23%、16.7%、12.9%、

8.8%和 8.1%。此后海水深度增加工频电阻减小幅度逐渐变缓并趋于稳定,当海水深度达到 3.0 m 时,工频接地电阻减小到 0.8 Ω 。工频接地电阻随海水深度的变化趋势如图 3 所示。

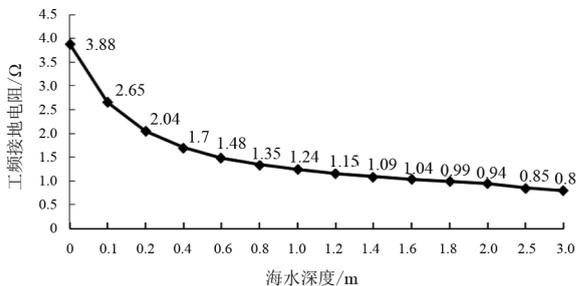


图 3 不同海水深度对工频接地电阻的影响

3.2 淤泥层厚度

装机规模为 4 MW,管桩桩长为 6 m,桩径为 0.3 m,分析淤泥层厚度从 0 到 0.5 m 变化时对工频接地电阻的影响。

工频接地电阻随淤泥层厚度增加而减小,但随着海水深度增加,淤泥层厚度对接地电阻的影响逐步减少。海水深度为 0 m 时,淤泥层厚度对接地电阻的影响最大,此时淤泥层厚度 0 m、0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m 和 0.5 m 对应的接地电阻分别为 3.88 Ω 、3.55 Ω 、3.15 Ω 、3.08 Ω 、3.02 Ω 和 2.97 Ω ,降幅分别为 8.5%、11.3%、2.2%、1.9%和 1.7%,其中以淤泥层厚度从 0 m 增加至 0.2 m 时对接地电阻的影响最大,之后淤泥层厚度增加,接地电阻变化减缓。当海水深度大于 0.6 m 后,淤泥层厚度变化对方阵工频接地电阻几乎无影响。工频接地电阻随淤泥层厚度的变化趋势如图 4 所示。

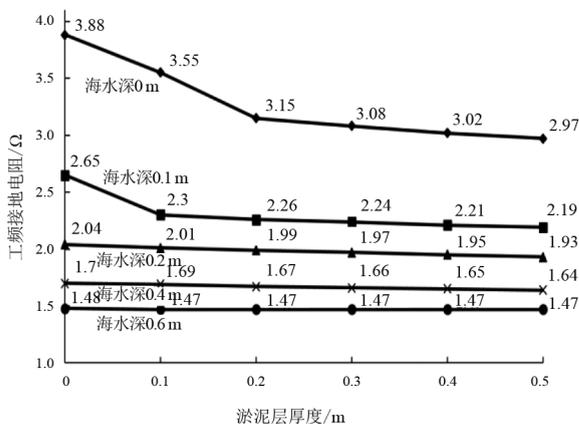


图 4 不同淤泥层厚度对工频接地电阻的影响

3.3 装机规模

管桩桩长为 6 m,桩径为 0.3 m,淤泥层厚度为 0 m,海水深度变化范围为 0~0.6 m,分析装机

规模分别为 4 MW、6 MW、8 MW、10 MW、12 MW 和 14 MW 时工频接地电阻的变化。

当落潮地面裸露时,4 MW、6 MW、8 M、10 MW、12 MW、14 MW 装机规模下的工频接地电阻分别为 3.88 Ω 、2.89 Ω 、2.36 Ω 、1.99 Ω 、1.75 Ω 、1.58 Ω ,降幅分别为 25.5%、18.3%、15.6%、12.0%、9.7%。

当海水深度为 0.1 m 时,4 MW、6 MW、8 MW、10 MW、12 MW、14 MW 装机规模下的工频接地电阻分别为 2.65 Ω 、2.09 Ω 、1.75 Ω 、1.51 Ω 、1.35 Ω 、1.25 Ω ,降幅分别为 21.1%、16.3%、13.7%、10.5%、7.4%。

当海水深度为 0.6 m 时,4 MW、6 MW、8 MW、10 MW、12 MW、14 MW 装机规模下的工频接地电阻分别为 1.48 Ω 、1.24 Ω 、1.09 Ω 、0.98 Ω 、0.92 Ω 、0.88 Ω ,降幅分别为 16.2%、12.1%、10.1%、6.1%、4.3%。

随着装机规模的增大,预应力管桩数量增加,接地电阻减小,但减小幅度逐步变缓。当落潮地面裸露时,装机规模对接地电阻的影响最大。随着海水深度的增加,装机规模对接地电阻的影响逐渐减小。工频接地电阻随装机规模的变化趋势如图 5 所示。

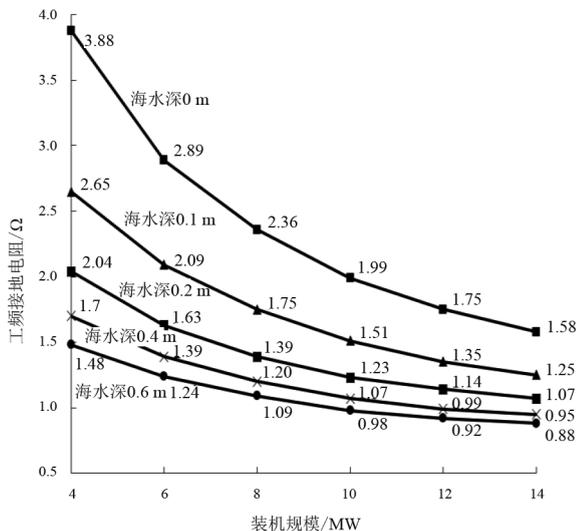


图 5 装机规模对工频接地电阻的影响

3.4 管桩桩长

装机规模为 4 MW,管桩桩径为 0.3 m,海水深度为 0 m,淤泥层厚度变化范围为 0~0.2 m,分析桩长为 6 m、8 m、10 m、12 m、14 m 时工频接地电阻的变化。

当无淤泥层,桩长为 6 m、8 m、10 m、12 m、14 m 时,工频接地电阻分别为 3.88 Ω 、4.05 Ω 、4.26 Ω 、4.47 Ω 和 4.69 Ω ,增长幅度分别为 4.2%、4.9%、4.7%和 4.7%,几乎为线性增长;当淤泥层厚度为 0.1 m,桩长为 6 m、8 m、10 m、12 m、14 m 时,工频接

地电阻分别为 3.55 Ω、3.68 Ω、3.81 Ω、3.95 Ω 和 4.09 Ω,增长幅度分别为 3.7%、3.5%、3.7%和 3.5%;当淤泥层厚度增大到 0.2 m 以上,桩长为 6 m、8 m、10 m、12 m、14 m 时,相同淤泥层厚度下工频接地电阻无变化。

当无淤泥层时,地层电阻率单一,接地电流主要通过管桩下部及端部进行散流,由于桩间距固定而桩长增加导致桩端散流时的屏蔽效应增大,故接地电阻增加;淤泥层有较低的电阻率,能起到一定的散流效果,此时接地电阻有所下降,但厚度不足时仍有部分接地电流通过桩端散流,桩长增加导致屏蔽效应增大、接地电阻增加;当淤泥层厚度已经足够大到可以释放几乎全部的接地电流时,桩端无散流,桩长的变化不对接地电阻产生影响。工频接地电阻随管桩长度的变化趋势如图 6 所示。

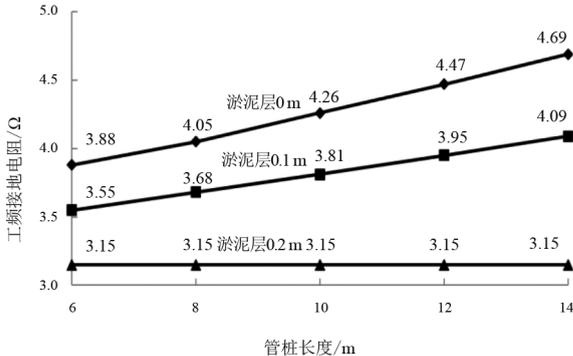


图 6 管桩长度对工频接地电阻的影响

4 冲击接地电阻分析

潮间带滩涂区域地势开阔平坦,大面积的光伏方阵易遭受雷电袭击,如果冲击接地电阻过大,将造成电网电位异常升高,从而导致组件、逆变器、箱式变压器等设备的损坏。因此,分析接地装置在雷电流作用下的冲击特性对光伏系统的雷电防护至关重要。下面以支架为基本单元建模进行分析。

4.1 管桩桩长及支架数量

落潮地面裸露是对接地电阻最不利的情况,分析此时管桩长度和支架数量对接地电阻和冲击系数的影响。

通过计算,在支架数量较少时冲击接地电阻较大,但随着支架数量增加接地电阻减小,且减小的幅度逐步降低。当桩长为 6 m,支架数量达到 16 组时,冲击接地电阻为 9.05 Ω,小于 10 Ω。与工频接

地电阻特性相反,冲击接地电阻随管桩桩长增加而减小且幅度逐步降低,这同文献[6]研究结论一致。冲击接地电阻随支架数量的变化趋势如图 7 所示。

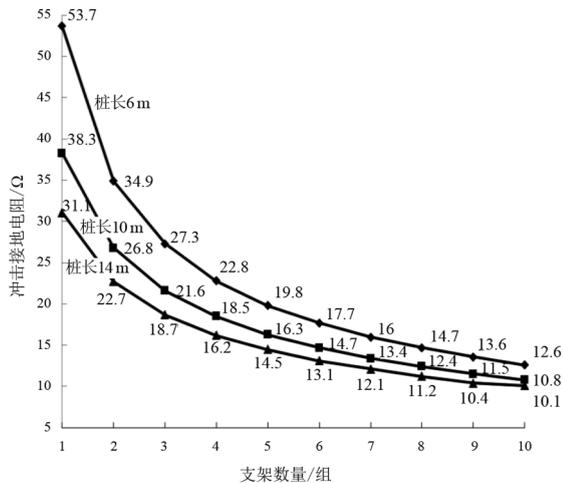


图 7 不同管桩长度及支架数量对冲击接地电阻的影响

4.2 海水深度

海水深度对冲击接地电阻的影响很大,当桩长为 6 m,单组支架在海水深度为 0.5 m、1.0 m 和 2.0 m 时冲击接地电阻分别为 5.41 Ω、3.27 Ω 和 1.95 Ω,仅为落潮地面裸露时冲击接地电阻 53.70 Ω 的 10.07%、6.09%和 3.63%。这是由于海水浸泡改善了管桩的电阻率以及海水较强的散流能力使得冲击接地电阻得到大幅降低。冲击接地电阻随海水深度的变化趋势如图 8 所示。

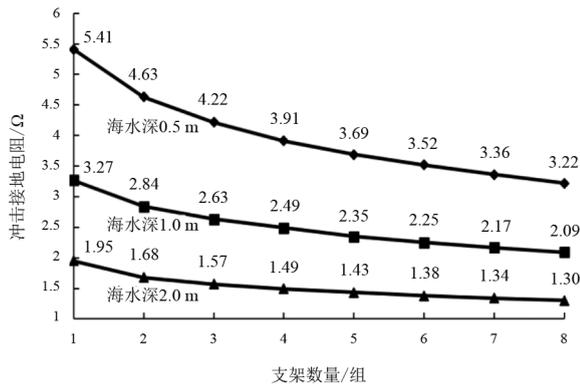


图 8 不同海水深度对冲击接地电阻的影响

5 结论

上面分析了海水深度、淤泥层厚度、装机规模、管桩桩长对工频接地电阻的影响。当落潮地面裸露时工频接地电阻最大,在管桩桩长为 6 m,桩径为 0.3 m,淤泥层厚度为 0 m,预应力管桩电阻率为 200 Ω·m,砂石层电阻率为 1500 Ω·m 条件

下,单个 4 MW 方阵的工频接地电阻值为 3.88 Ω ,满足光伏电站工频接地电阻小于 4 Ω 的要求。海水、淤泥由于具有较强的散流能力,可大大降低工频接地电阻,随着厚度增加接地电阻下降明显。光伏电站装机规模越大,管桩数量越多,接地电阻越小。由于管桩间距固定而桩长增加将导致桩端散流时屏蔽效应增大,故桩长增加工频接地电阻增大。

管桩长度、管桩数量和海水深度的增加均可降低冲击接地电阻。其中海水的影响最大,随着海水深度增加,冲击接地电阻快速下降。落潮地面裸露时,冲击接地电阻值较大,在管桩桩长为 6 m,桩径为 0.3 m,淤泥层厚度为 0 m,预应力管桩电阻率为 200 $\Omega \cdot \text{m}$,砂石层电阻率为 1500 $\Omega \cdot \text{m}$ 条件下,当支架数量达到 16 组时,冲击接地电阻小于 10 Ω 。

对于十万千瓦级装机容量的潮间带海上光伏项目,其管桩数量是所建模型的几十、数百倍,利用预应力管桩做自然接地体,其工频接地电阻和冲击接地电阻将小于上述计算值。所采用的仿真手段得到的海水深度、淤泥层厚度、装机规模以及桩长对海上光伏项目工频接地电阻和冲击接地电阻的影响规律,对同类项目接地设计具有一定的参考意义。未来在潮间带开展光伏建设,可根据光伏阵列设计方

(上接第 16 页)

水模式下所出现的问题以及工程调试提供一套仿真工具。通过仿真分析能得到以下结论:

- 1) 机组使用直接开度控制,在定开度、变转速运行方式时,机组转速越大,抽水功率越大;
- 2) 机组使用直接开度控制,在定转速、变开度运行方式时,机组开度越大,抽水功率越大;
- 3) 机组使用外加功率外环控制,在定功率、变转速运行方式时,机组的开度会随着转速的升高而降低,以维持恒功率运行;
- 4) 机组使用外加功率外环控制,在定转速、变功率运行方式时,机组的有功功率跟踪存在延时,且抽水功率越大,开度越大。

参考文献

- [1] 史华勃,王渝红,滕予非,等.全功率变速抽水蓄能机组快速功率模式小信号建模[J].电力系统自动化,2022,46(4):162-169.
- [2] 陈刚,丁理杰,韩晓言,等.抽水蓄能在四川电网的应用前景展望[J].四川电力技术,2022,45(2):1-6.

案、实测土壤电阻率等对预应力管桩做自然接地体的合理性进行验证。

参考文献

- [1] 华林青.浅析一种新型水上光伏电站防雷接地方法[J].太阳能,2019(6):52-54.
- [2] 梁坤.混凝土导电特性及其影响因素试验研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [3] 中国电力企业联合会.交流电气装置的接地设计规范:GB/T 50065—2011[S].北京:中国计划出版社,2011.
- [4] 夏能弘,陆衡,陆嘉骁.考虑潮间带接地环境的海上风机一体化电磁暂态模型[J].电瓷避雷器,2020(4):46-53.
- [5] 中国电力企业联合会.光伏发电站设计规范:GB 50797—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [6] 张敏,曹晓斌,李瑞芳,等.输电线路杆塔接地极冲击接地电阻特性分析[J].电瓷避雷器,2012(4):5-9.

作者简介:

邓 鹏(1981),男,高级工程师,从事新能源设计工作;
周 秦(1980),男,高级工程师,从事新能源管理工作;
宋兆非(1988),男,工程师,从事新能源设计工作;
何 垒(1985),男,工程师,从事新能源设计工作。

(收稿日期:2023-08-03)

- [3] 周文越,史华勃,陈刚.全功率变速抽水蓄能机组保护配置及整定方法[J].四川电力技术,2023,46(2):28-31.
- [4] PAN Pengyu, DING Lijie, SHI Huabo, et al. Multi-mode simulation modeling of full-size variable speed pumped storage system including the complete unit links [C]. 2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE), Chengdu, China, 2023:13-17.
- [5] 徐斌,金龙云,熊健,等.抽水蓄能电站全功率变频控制策略[J].电力电子技术,2020,54(7):33-35.
- [6] 畅欣,韩民晓,郑超.全功率变流器可变速抽水蓄能机组的功率调节特性分析[J].电力建设,2016,37(4):91-97.

作者简介:

潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为全功率变速抽水蓄能机组优化控制、电力系统宽频带阻抗测量;
史华勃(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为抽水蓄能发电技术、电力系统分析计算与稳定控制等;
陈 刚(1985),男,博士,正高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;
丁理杰(1981),男,博士,正高级工程师,研究方向为大电网安全稳定分析与控制。(收稿日期:2023-08-07)