

新能源场站无功补偿装置投退对电网运行影响研究

杨佩佩¹, 汤文², 韩自奋², 刘宗洋², 杜汶翰¹

(1. 国网甘肃省电力公司兰州供电公司, 兰州 730050; 2. 国网甘肃省电力公司, 兰州 730000)

摘要: 随着集中式和分布式新能源在配电网中所占比例的不不断提升, 这些新能源的波动性和间歇性特征对配电网产生了更加显著的影响, 导致了配电网电压频繁波动, 给无功支持和电压稳定性带来了前所未有的挑战。本文针对新能源场站的无功补偿装置投退对电网运行产生的电压稳定性问题展开研究。从理论补偿和系统仿真两个方面研究了当单个新能源场站无功补偿装置因检修或故障等原因被迫退出运行后, 考虑并网点电压的变化能允许新能源场站的最大发电出力。提出了一种基于并网点电压变化的新能源场站无功补偿装置投退后场站的最大发电出力优化策略。仿真结果表明, 新能源场站无功补偿装置因故退出运行后, 在用电负荷高峰需要新能源场站充分发挥顶峰作用时, 光伏发电站最大可以送出的有功出力约为总装机容量的 20%, 该结论能够有效指导电力调度机构对新能源场站发电出力精准控制, 提升电网的运行效率和电压稳定性, 并增强调度机构对电网和电源的协调管理能力。

关键词: 新能源; 无功补偿; 电网运行; 电压稳定

Study on Influence of Reactive Power Compensation Device Switching on Power Grid Operation in New Energy Stations

YANG Peipei¹, TANG Wen², HAN Zifen², LIU Zongyang², DU Wenhan¹

(1. State Grid Gansu Lanzhou Electric Power Supply Company, Lanzhou 730050, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the increasing proportion of centralized and distributed new energy in the distribution network, the fluctuation and intermittency characteristics of these new energy cause more significant impact on the distribution network, which leads to frequent voltage fluctuations in the distribution network and brings unprecedented challenges to the reactive power support and voltage stability. In this paper, the voltage stability of the power grid operation due to the withdrawal of the reactive power compensation device of the new energy station is studied. The permitted maximum power generation output of the new energy station is studied from the aspects of theoretical compensation and system simulation when the static var generator of new energy station is removal from operation due to the maintenance or fault and also with consideration of the voltage variation of the grid connection point. The simulation results show that after the out of operation of the reactive power compensation device of the new energy station for some reason, the maximum active output of the photovoltaic power station is about 20% of the total installed capacity when the peak power load of the new energy station is required to give full play to the peak role. This conclusion can effectively guide the power dispatching agency to accurately control the power generation output of the new energy station so to improve operation efficiency and voltage stability of the power grid, and enhance the coordination and management ability of the dispatching agency to the power grid and the power supply.

Keywords: new energy; reactive power compensation; power grid operation; voltage stability

0 引言

随着全球能源结构的转型和新能源技术的快速发展,新能源场站在电力系统中的比重逐渐增加。然而,新能源场站的随机性、间歇性、波动性对电网的影响加大,造成配电网电压的频繁波动问题,为无功支撑和电压安全带来新的挑战^[1-3]。无功补偿装置作为电力系统中重要的电压调节手段,对于维持电网稳定和提高电能质量具有关键作用,在新能源场站侧配置无功补偿装置对提高并网点电压,改善电能质量及抑制高频谐波等具有重要作用。因此,研究新能源场站无功补偿装置的投退对电网运行的影响具有重要的理论和实践意义。

文献[4]统筹考虑无功补偿设备的差异化调节特性,提出了一种基于深度强化学习的双时间尺度配电网无功电压优化方法,从长期和短期两个时间尺度上进行分析,分别制定了并联电容器组的投切计划及静态无功补偿器(static var compensator, SVC)的出力计划,来调整电压偏移,使整个电力系统中网损最小化,有效应对新能源并网所导致的配电网电压频繁波动的问题;文献[5]对含静止无功补偿装置的光伏电站高频谐振机理进行分析,研究含静止无功发生器这种无功补偿装置与场站自身的电力电子变换器之间的交互作用,建立了光伏电站统一阻抗模型,提出了基于静止无功发生器(static var generator, SVG)高频阻抗重塑的光伏电站谐振抑制方法,为降低新能源场站中的高频振荡事故发生风险提供了新思路;文献[6]旨在解决交直流混合联网系统中网侧电压下降时并网换流站如何在无功支持和有功平衡之间取得平衡的问题,提出了一种基于 NSGA2-DS 的多目标优化方法,用户可以根据自身需求,选择更为合适的微电网控制策略。以上文献均从不同角度考虑了如何应对新能源场站接入后对电网带来的电能质量及电压稳定性方面的影响,提出的解决策略也偏重于从无功补偿装置的分组投切与出力计划策略,以及无功功率平衡的多目标优化控制策略等,但均为考虑新能源场站的无功补偿装置因故退出运行后对并网点电压的影响问题,如果此时对新能源场站的出力不进行有效控制,将可能造成对系统电压稳定性及电能质量的影响。

本文主要分析了目前新并网的新能源场站配置的无功补偿装置的类型、运行特性及其投退对电网运行的影响,并从工程实践案例出发,描述了新能源场站无功补偿配置方案,最后构建了一个典型

的光伏发电站模型,通过理论和系统仿真两种方法分析了所需配置的无功补偿装置的容量,最后以并网点电压跌落到最低极限值为约束条件,当该光伏发电站内无功补偿装置因检修或故障等原因退出运行后,假设电力系统频率不受影响的前提下,通过仿真模型试验新能源场站最大的发电出力,从而提高电网调度机构对新能源场站和电网的协调调控能力。

1 新能源场站无功补偿装置概述

1.1 无功补偿装置的类型及运行特性

无功补偿装置作为新能源场站的重要组成部分,能够有效地调节无功功率,满足电网的无功需求,从而保证电网的稳定运行^[7]。SVC、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、SVG 和滤波电容器(filter capacitor, FC)是电力系统中用于无功功率补偿和电压调节的4种主要装置,其工作原理和特点,响应速度、调节精度和调节范围,以及适用的应用场景各有不同。

1)响应速度。SVC 由可控硅阀控制的电抗器组成,可以快速调整无功功率,其响应速度一般在几十毫秒到几百毫秒之间,具体取决于控制系统的设计和所采用的控制策略^[8];STATCOM 与 SVG 均使用功率电子变换器来产生无功功率,与 SVC 相比,具有更快的响应速度,通常在几毫秒到几十毫秒之间,能够提供连续的无功功率调节,且对电压波动的抑制效果更好;FC 是一种被动式无功补偿装置,其响应速度取决于电容器的充放电时间,其响应速度相对较慢,通常在几百毫秒到几秒之间,适用于一些对响应速度要求不高的场合。

2)调节精度。SVC 的调节精度受到最小步长的限制,其调节精度通常在1%到5%的额定容量之间;STATCOM 调节精度非常高,可以达到0.1%的额定容量或更高^[9];SVG 调节原理与 STATCOM 类似,但更侧重于谐波补偿和电压稳定^[10];FC 作为被动式无功补偿装置,其调节精度取决于电容器的容量和并联的数量,电容器的容量通常是固定的,只能进行阶梯式的无功补偿,因此调节精度相对较低。

3)调节范围。SVC、STATCOM 和 SVG 具有较宽的调节范围,可以达到其额定容量的-100%~100%,能够满足新能源场站在不同工况下的无功补偿需求,且 SVG 更侧重于提供低电压侧的无功功率支持,更适用于新能源场站侧使用,而 FC 的调节范围相对较窄,需要通过合理配置和组合来满足电网的无功需求。

1.2 无功补偿装置投退对电网运行的影响

新能源场站的无功补偿装置的投退对电网运行系统稳定性及电能质量等方面有着显著的影响,具体表现在以下几个方面。

1)电压稳定性。无功补偿装置能够维持新能源场站的电压水平,可以提高电网的电压稳定性。当装置投入时,能够提供必要的无功支持,维持电压在合理水平;相反,如果无功补偿装置退出,可能会导致电网电压下降或不稳定,特别是在负荷高峰时段或负荷变化较大的情况下^[11]。

2)频率稳定性。无功补偿装置能够在一定程度上参与电网的频率调节,尤其是在电网频率发生小幅波动时。装置的投入有助于维持电网频率的稳定,保证电能质量;装置的退出可能会使电网对频率波动的调节能力下降。

3)电网谐波。无功补偿装置通常具备一定的谐波补偿功能,能够减少电网中的谐波含量。装置的投入有助于减少电压和电流的谐波失真,提高电能质量^[12];反之,装置的退出可能会增加谐波失真,降低电能质量。

4)功率因数。无功补偿装置的投入有助于改善电网的功率因数^[13]。装置可以根据实际情况自动调节,提供或吸收无功功率,使得功率因数保持在接近1的理想状态。装置退出后,电网的功率因数可能会降低,增加电网的运行成本。

5)供电可靠性。无功补偿装置能够在电网发生故障或负荷变化时快速响应,提供必要的无功支持,帮助维持电网的稳定运行。装置的投入提高了供电的可靠性,从而保证了电能质量;而装置的退出可能会在电网出现问题时影响供电的稳定性。

6)故障响应。新能源场站的无功补偿装置在电网发生瞬态事件时,能够提供快速的无功支持,帮助电网快速恢复到正常状态^[14]。装置的投入有助于提高电网对瞬态事件的响应能力,提升电能质量;装置的退出可能会使电网在面对瞬态事件时恢复速度变慢。

综上所述,无功补偿装置对于维持和提升电力系统稳定性及电能质量起着关键作用。合理配置和调度新能源场站的无功补偿装置,可以有效提高新能源场站以及整个电网的电能质量,确保供电的稳定性和可靠性。然而,新能源场站的无功补偿装置的投退需要根据电网的实际运行状况和新能源场站的发电特性进行合理调度,因此,需要对工程上实际运行的新能源场站无功补偿配置方案进行分析,并通过建模和仿真验证的方法得到新能源场

站出力的最优调度策略。

2 新能源场站无功补偿配置方案

2.1 一般配置原则

1)无功补偿容量。应根据系统规模、负荷特性和电网要求进行合理配置。一般而言,无功补偿容量应满足系统在最大负荷时的无功需求。通过10~110 kV电压等级并网的光伏发电站功率因数应能在超前0.98至滞后0.98范围内连续可调,具体分电压等级的无功容量配置应按照GB/T 19963.1—2021《风电场接入电力系统技术规定》^[15]及GB/T 19964—2024《光伏电站接入电力系统技术规定》^[16]执行。

2)无功补偿方式。在选择无功补偿方式时,需要综合考虑场站的规模、负荷特性、电压等级等实际情况选择合适的无功补偿方式。无功补偿方式主要包括静态无功和动态无功补偿。静态无功补偿主要通过电容器、电抗器等装置实现,对于规模较小、负荷变化较小的新能源场站,可以采用并联电容器补偿方式,以降低成本并满足无功补偿需求^[17~20];动态无功补偿是通过可控硅、逆变器等装置实现的,对于规模较大、负荷变化较大的新能源场站,可以考虑采用动态无功补偿方式,以提高系统的适应性和稳定性;对于分布式新能源场站,可以采用分级补偿策略,将无功补偿装置分布在不同电压等级的节点上,以实现更精细化的无功管理。

3)无功补偿配置方案。在工程实践中,新能源场站的无功补偿配置方案需要考虑多个因素,包括电站的地理位置、气候条件、负载特性、电网要求以及经济效益等。在其无功输出范围内,应具备根据并网点电压水平调节无功输出,参与电网电压调节的能力,其调节方式、参考电压、电压调差率等参数应可由电网调度机构远程设定^[21]。配置时应先进行需求分析,分析电站有功功率和无功功率输出的特性,了解当地电网的无功需求和电压等级,以及电网对功率因数和电压波动的要求;其次进行无功补偿设备选型,目前工程上大多数大中型新能源场站均配置SVG,它适用于需要快速响应和精确控制无功的场合,可以在新能源场站中提供动态无功支持。无功补偿设备容量一般会按照电站装机容量的20%~30%来配置,安装地点一般SVG会选择在电站的升压站或并网点附近安装,以实现快速、精确的无功调节。此外,还会配置一套自动电压控制系统(automatic voltage control, AVC)及远程监控系统,实现无功补偿设备的自动调节及运行状态的实时监控。

2.2 工程实践案例

某 50 MW 光伏电站项目充分利用并网逆变器的无功容量及其调节能力,采用的并网逆变器具有无功功率调节功能,功率超前 0.90 至滞后 0.90 范围可调,并在新建升压站配置 35 kV SVG 无功补偿装置,SVG 装置采用 35 kV 直挂式,无功容量为 ± 20 Mvar,按照电站装机容量的 20% 来配置。规定光伏发电接入电网后,公共连接点的电压偏差应满足 GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》的规定,110 kV 三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$,工程实践中一般留有裕度按不超过标称电压 $-3\%\sim 7\%$ 控制。

3 典型案例仿真分析

本文以一个典型的 110 kV 并网的光伏发电站为例建立模型,分析该光伏电站的电压及无功潮流变化,从理论计算和系统仿真两个方面进行典型实例验算,最终求得该光伏电站所需的无功补偿容量。最后假设该光伏电站无功补偿装置因故退出运行,在不影响系统电压的情况下,当并网点电压下降至运行下限时,光伏电站在满足电压曲线要求的前提下可发出的最大有功出力。

光伏电站所需的容性无功补偿主要由 3 部分构成:1)升压站主变无功损耗;2)站内就地升压箱变无功损耗;3)场区汇集线路及送出线路感性无功损耗。对于光伏电站而言,厂区内的汇集系统主要为电缆,其充电功率基本可与其感性无功损耗相抵消,因此可近似认为,仅考虑送出线路的感性无功损耗。光伏电站所需的感性无功补偿主要为空载时场区内汇集线路及送出线路的充电功率^[2]。

下文构建一典型的 50 MW 光伏电站。假设送出电压等级为 110 kV,导线型号 LGJ-240,长度为 20 km,升压站主变容量 50 MVA,35 kV 汇集线路 3 条,每回汇集线路容量分别为 20 MW、20 MW、10 MW,均采用截面为 240 mm² 电缆,每回长度分别为 2 km、2 km、1.2 km,就地升压箱变 20 台,每台 2.5 MVA。变压器参数为:

1)升压变:容量比为 100/100;抽头电压为 $115\pm 8\times 1.25\%/37\pm 2\times 2.5\%/10.5$ kV;接线组别为 YN,yn0+d11;

2)阻抗电压:10.5%;

3)箱变:额定容量为 2 500 kVA;额定电压为 $37\pm 2\times 2.5\%/0.8$ kV;接线组别:Y,d11;阻抗电压为 $U_k=6.5\%$ 。

3.1 理论计算无功补偿量

经计算:主变压器感性无功损耗为 $50\times 10.5\%=5.25$ Mvar;就地升压变感性无功损耗为 $2.5\times 6.5\%\times 20=3.25$ Mvar,送出线路感性无功损耗为 $3\times 262^2\times 20\times 0.384\times 10^{-6}=1.58$ Mvar。全站容性无功补偿量为 $5.25+3.25+1.58=10.08$ Mvar。35 kV,240 mm² 截面电缆单公里充电功率为 0.08 Mvar;110 kV, LGJ-240 架空线单公里线路充电功率约为 0.034 Mvar,最终整个场站所需的感性无功补偿容量为 $0.08\times 5.2+0.034\times 20=1.096$ Mvar。

因此,整个光伏场站总的无功补偿量为:容性无功补偿容量为 10.08 Mvar、感性无功补偿容量为 1.096 Mvar。

在容性无功补偿计算中,未考虑 35 kV 汇集电缆和 110 kV 送出线路充电功率抵消作用,在感性无功补偿计算中,未考虑空载升压变和空载就地箱变的感性无功抵消作用。若考虑汇集电缆和送出线路充电功率抵消作用,容性补偿量为 $10.08-1.096=8.984$ Mvar。

需要特别说明的是,线路的充电功率与实际电网运行电压密切相关,计算时所使用的数值,是在标称电压下计算所得,因此,手算出的无功补偿量一般较为保守、偏大。

3.2 系统仿真计算无功补偿量

下文针对该典型光伏电站使用 PSD-BPA 软件进行无功补偿量的仿真计算。典型光伏电站满载时系统潮流输送仿真图见图 1,典型光伏电站空载时系统潮流输送仿真图见图 2。

由此可见,通过软件建模后,无功补偿量为容性无功补偿量 8 Mvar、感性无功补偿量 1 Mvar。

3.3 系统仿真计算无损传输时最大出力

当电站侧无功补偿装置因故退出后,在不计及并网逆变器无功出力的情况下,考虑公网电压下降至 0.97 额定电压时,通过系统仿真模拟出光伏汇集站侧的电压。典型光伏电站公网侧电压下降至下限时的潮流分布见图 3,典型光伏电站达到无损传输时的潮流分布见图 4。

当电站侧无功补偿装置退出后,电网侧电压下降至 0.97 p.u. 时,电站侧 110 kV 电压为 0.963 p.u.,不满足要求。由于感性无功流向是由高电压流向低电压,因此,送出线路上只有容性无功等于感性无功时,光伏电站侧电压才能满足要求,即实现无损传输,输送自然功率。经系统仿真模拟计算,要达到无损传输,该光伏电站最多能送出的有功出力约为 10 MW。

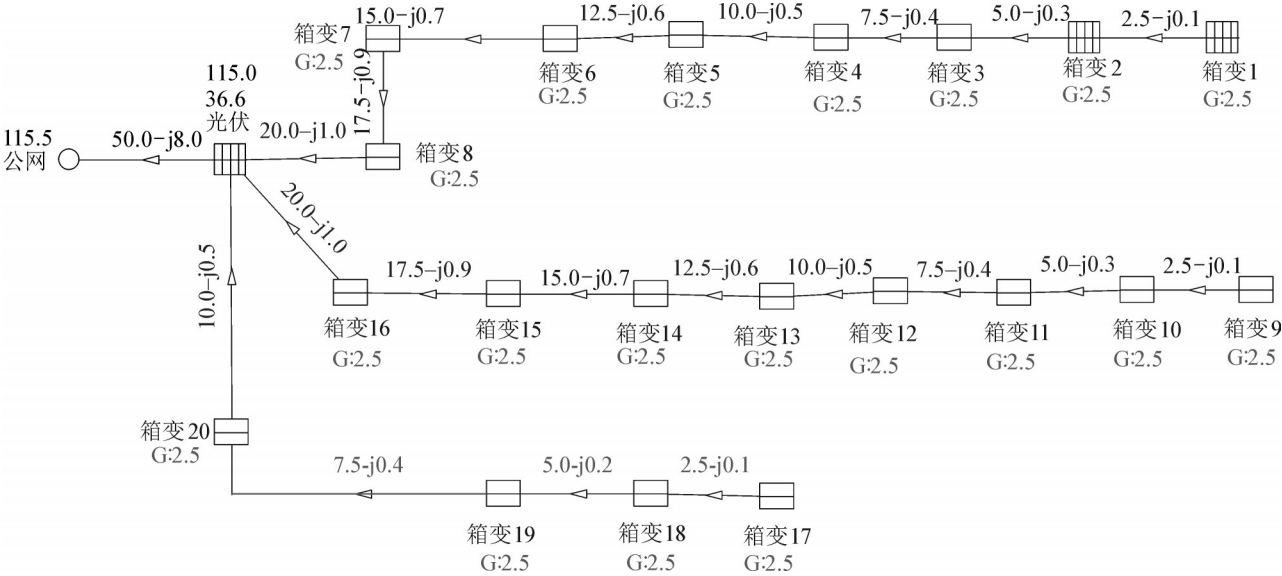


图1 典型光伏电站满载时系统潮流输送仿真图

Fig. 1 Transmission simulation diagram of system flow at full load of typical photovoltaic power station

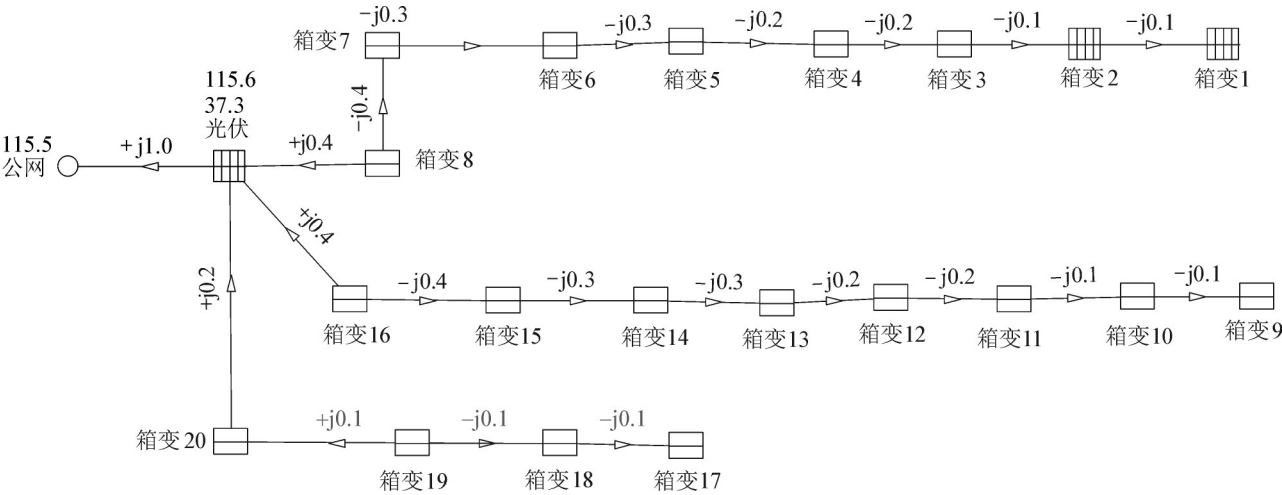


图2 典型光伏电站空载时系统潮流输送仿真图

Fig. 2 Transmission simulation diagram of system flow at no load of typical photovoltaic power station

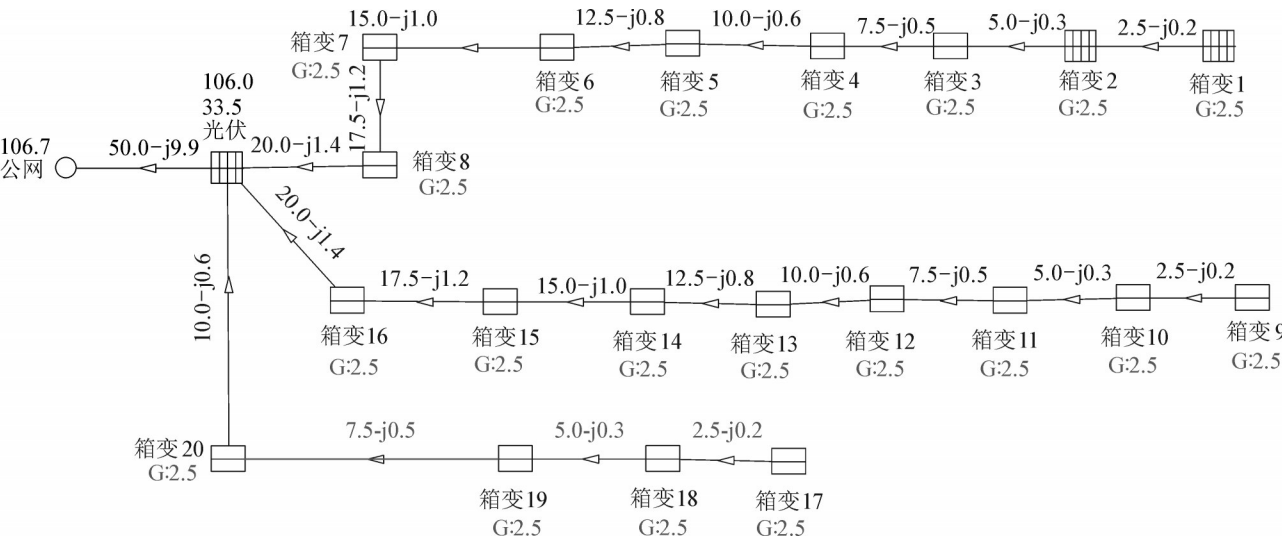


图3 典型光伏电站公网侧电压下降至下限时的潮流分布

Fig. 3 Power flow distribution of a typical photovoltaic power station when the voltage on the public network side drops to the lower limit

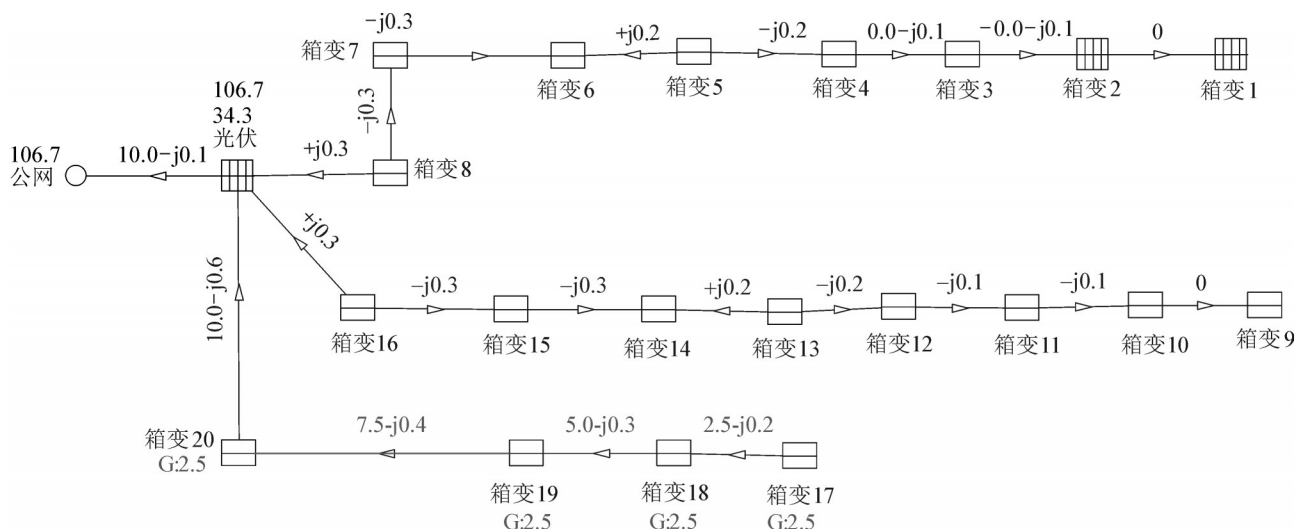


图4 典型光伏电站达到无损传输时的潮流分布

Fig. 4 Power flow distribution when the typical photovoltaic power station reaches lossless transmission

4 结语

1) 本文通过对不同类型的无功补偿装置的工作原理、运行特性以及适用的场景进行经济技术比较,并总结归纳出无功补偿装置的综合比选结果,对各种应用场景下无功补偿装置的选择提供了理论依据。分析出当前新能源场站应用最多的无功补偿装置为静止无功发生器,结合系统仿真进一步分析了 SVG 对系统无功和电压的支撑作用。

2) 本文从无功补偿装置的配置容量、补偿方式以及控制策略等方面进行深入分析,提出了新能源场站的无功补偿配置方案,并构建了一个典型的集中并网光伏电站,分别从理论计算和系统仿真两个方面进一步分析了场站满载和空载时潮流的变化过程,最终得出场站所需配置的感性和容性无功补偿量。

3) 通过系统仿真模拟电站侧无功补偿装置因故退出后,在不计及并网逆变器无功出力的情况下,考虑公网电压下降至最低极限值时,光伏电站的潮流分析及汇集站侧的电压情况。通过系统仿真计算,得出当新能源场站无功补偿装置因故退出运行后,在用电负荷高峰需要新能源场站充分发挥顶峰作用时,光伏电站最大可以送出的有功出力约为总装机容量的 20%,以上的结论可以指导电力调度系统对新能源场站发电出力的精准控制,提高调度机构对电网和电源的协调管理能力。

参考文献

- [1] 白建华,辛颂旭,刘俊,等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699-3705.
- BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of real-

izing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.

- [2] TANG Zhiyuan, HILL D J, LIU Tao, et al. Hierarchical voltage control of weak subtransmission networks with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 187-197.
- [3] XU Yan, DONG Zhaoyang, ZHANG Rui, et al. Multi-timescale coordinated voltage/var control of high renewable-penetrated distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4398-4408.
- [4] 李鹏,姜磊,王加浩,等. 基于深度强化学习的新能源配电网双时间尺度无功电压优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6255-6265.
- LI Peng, JIANG Lei, WANG Jiahao, et al. Optimization of dual-time scale reactive voltage for distribution network with renewable energy based on deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6255-6265.
- [5] 张东辉,陈新,杨舒婷,等. 含静止无功补偿装置的光伏电站高频谐振分析及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9580-9593.
- ZHANG Donghui, CHEN Xin, YANG Shuting, et al. Analysis of high-frequency resonance and suppression strategy of photovoltaic power plant with static reactive power compensation device[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9580-9593.
- [6] 李晓利,高金峰. 用于配电网多目标无功优化的改进粒子群优化算法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 106-111.
- LI Xiaoli, GAO Jinfeng. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 106-111.
- [7] 刁浩然,杨明,陈芳,等. 基于强化学习理论的地区电网

- 无功电压优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 408-414.
- DIAO Haoran, YANG Ming, CHEN Fang, et al. Reactive power and voltage optimization control approach of the regional power grid based on reinforcement learning theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 408-414.
- [8] 徐峰达, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 基于模型预测控制理论的风电场自动电压控制[J]. 电力系统自动化, 2015(7): 59-67.
- XU Fengda, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Automatic voltage control of wind farms based on model predictive control theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(7): 59-67.
- [9] 黄永宁, 张爽, 周建丽, 等. 基于STATCOM的风电场电能质量治理原理及应用效果分析[J]. 电气应用, 2014, 33(3): 70-75.
- [10] 范振超. SVG无功补偿装置在新能源光伏发电中的应用研究[J]. 光源与照明, 2022(12): 112-114.
- [11] 张宇精, 乔颖, 鲁宗相, 等. 含高比例分布式电源接入的低感知度配电网电压控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1528-1535.
- ZHANG Yujing, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Voltage control for partially visible distribution networks with high DG penetration[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1528-1535.
- [12] 乐瑶, 王继伟. 10~35 kV集中式光伏电站的无功补偿容量计算方法[J]. 科技创新与应用, 2015(33): 188.
- [13] 李琦, 乔颖, 张宇精. 配电网持续无功优化的深度强化学习方法[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1473-1480.
- LI Qi, QIAO Ying, ZHANG Yujing. Continuous reactive power optimization of distribution network using deep reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1473-1480.
- [14] 李斌. 计及低频振荡的混合无功补偿线路断路器开断特性[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [15] 风电场接入电力系统技术规定 第1部分 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 2021.
- Technical specification for connecting wind farm to power system—Part 1: On shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. 2021.
- [16] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2024[S]. 2024.
- Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024[S]. 2024.
- [17] 郑海涛, 郑昕, 吴兴全, 等. 大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014(16): 149-154.
- ZHENG Haitao, ZHENG Xin, WU Xingquan, et al. Technical analysis of dynamic reactive power compensation equipment applied in large-scale grid connected wind power plant and photovoltaic substation[J]. Power System Protection and Control, 2014(16): 149-154.
- [18] 李兴, 李昂, 纪瑾, 等. 静止无功发生器的控制策略及仿真分析[J]. 电气开关, 2022, 60(1): 7-11.
- LI Xing, LI Ang, JI Jin, et al. Control strategy and simulation analysis of static reactive power generator[J]. Electric Switcher, 2022, 60(1): 7-11.
- [19] 胡臻, 崔挺, 吕虎, 等. 考虑电网动态特性的无功补偿配置方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 45-51.
- HU Zhen, CUI Ting, GUO Hu, et al. Reactive power compensation scheme considering dynamic characteristics of power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 45-51.
- [20] 安军, 周永超, 周毅博, 等. 考虑风荷不确定性的电源无功电压调差系数整定方法研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(4): 30-38.
- AN Jun, ZHOU Yongchao, ZHOU Yibo, et al. Optimization method for var-voltage adjustment coefficient considering wind power and load uncertainty[J]. Journal of Northeast Dianli University (Natural Science Edition), 2023, 43(4): 30-38.
- [21] 赵冬梅, 魏中庆, 祝晨丹, 等. 就地无常规电源支撑的新能源基地无功源优化配置方法[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 1-12[2023-9-12].
- [22] 戴林东. 静止无功补偿装置稳压控制及选址定容研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- 作者简介:**
- 杨佩佩(1984—), 女, 高级工程师, 主要从事电网运行及调度, 无功电压控制, 电网规划等工作。E-mail: 275828019@qq.com。
- 汤文(1988—), 男, 高级工程师, 通信作者, 主要从事电力系统及其自动化、新能源及储能运行控制、无功电压控制工作。E-mail: 253918867@qq.com。
- 韩自奋(1976—), 男, 正高级工程师, 主要从事水电、新能源(储能)及分布式电源并网调度运行控制, 电力市场、绿电、双碳等工作。E-mail: 7638403@qq.com。
- 刘宗洋(1994—), 男, 工程师, 主要从事电力系统调度运行、稳定计算、电力市场等工作。E-mail: liuzy_ee@163.com。
- 杜汶翰(1994—), 男, 工程师, 主要从事电网运行及调度, 新能源预测, 电网规划等工作。E-mail: 278615897@qq.com。