

# 分布式光伏电站无功补偿装置的设计与计算

张小聪

(惠州电力勘察设计院有限公司, 广东 惠州 516001)

**摘要:** 分布式光伏电站无功补偿装置的选型设计和容量计算过程中,当要求考虑光伏逆变器参与电网调节时,因缺少相关设计方案,给工程设计人员带来较大的困难。针对该问题,本文首先概述了分布式光伏电站的无功负荷和无功电源,分别给出了具体计算公式;其次,提出了折余自然无功负荷的概念,并按照迟相运行、进相运行和不参与电网调节等3种不同工况,分别进行了基于电网无功平衡的补偿容量计算,给出了通用计算公式;再次,分析讨论了不同情况下无功补偿装置选型及对应容量配置的具体方案,从而提供了一种分布式光伏电站无功补偿装置设计和计算方法;最后,提出了无功补偿装置谐波治理和安装位置选择的部分建议,为工程设计人员提供一定的参考。  
**关键词:** 无功负荷;无功电源;迟相;进相;无功平衡;补偿容量计算;补偿装置选型

## Design and Calculation of Reactive Power Compensation Device for Distributed Photovoltaic Power Station

ZHANG Xiaocong

(Huizhou Electric Power Design Co., Ltd., Guangdong Huizhou 516001, China)

**Abstract:** During the selection, design and capacity calculation process of reactive power compensation device of distributed photovoltaic power stations, the significant difficulties for engineering designers due to the lack of relevant design schemes, in case of participation of photovoltaic inverters in grid regulation, are required to be considered. Regarding this issue, the reactive loads and reactive power sources of the distributed photovoltaic power stations are described firstly and the specific calculation formulas are given respectively. Then, the concept of leftover natural reactive power load is proposed, and compensation capacity calculations based on grid reactive power balance are performed at such three different operating conditions as lagged phase operation, leading phase operation and non participation in grid regulation and the general calculation formula for compensation capacity is given. After that, the specific schemes for selecting reactive power compensation devices and corresponding capacity configurations under different situations are analyzed and discussed respectively, thus providing a design and calculation method for reactive power compensation device in distributed photovoltaic power plants. Finally, some suggestions for harmonic control and installation location selection of reactive power compensation device are proposed so to provide certain references for the engineering designers.

**Keywords:** reactive load; reactive power supply; lagged phase; leading phase; reactive power balance; compensation capacity calculation; selection of compensation device

## 0 引言

光伏逆变器、压缩空气发电电动机等具有多象限运行工况的分布式电源设备,给负责新能源规划设计的工程师们带来不小的挑战。由于缺少相关设计方案等原因,当要求考虑逆变器参与电网调节

时,部分工程设计人员在分布式光伏电站无功补偿装置的设计过程中出现困难,常常直接采用估计法粗略配置补偿容量,导致补偿装置要么选型偏大工程经济性差、要么刚投运即须扩容改造等不良现象<sup>[1-5]</sup>。因此,本文通过对光伏系统不同运行工况的分析,提出了一种适用于分布式光伏电站无功补偿

回路的容量配置计算方法和装置选型设计方案,旨在给工程设计人员在光伏电站无功补偿装置的设计与计算过程中提供一种实用、规范的参考方法。

本文针对分布式光伏电站无功补偿装置的容量配置和装置选型的问题,首先给出分布式光伏电站几种主要无功负荷和无功电源的具体计算公式,其次给出在迟相运行、进相运行和不参与电网调节等3种不同工况下,基于电网无功平衡的光伏电站无功补偿容量配置通用计算公式,以此为基础提出不同情况下补偿装置选型及对应容量配置的具体方案,本文最后提出无功补偿装置谐波治理和安装位置选择的部分建议。

## 1 光伏无功负荷和无功电源概述

目前通过中压公共线路并网的分布式光伏电站,一般采用组串式逆变器,其系统主接线形式为:光伏组件的直流经过逆变器逆变为交流后,采用低压交流电缆线路经交流汇流箱(如有)汇流到就地升压变压器低压侧母线,再采用中压交流电缆线路或中压交流电缆-架空线路经开关站或汇流站(如有)并网至中压公共线路上的公共连接点(point of common coupling, PCC)<sup>[5-10]</sup>。

电力系统中存在许多非线性元件,其中感性元件从系统中吸收并消耗感性无功功率,通常被称为无功负荷;而容性元件向系统发出并提供感性无功功率,通常被称为无功电源。结合光伏系统主接线可知,补偿前中压并网分布式光伏电站主要的无功负荷有:低压汇流电缆、升压变压器、中压并网电缆、中压并网架空线等的无功损耗;主要的无功电源有:低压汇流电缆、中压并网电缆、中压并网架空线等的充电功率<sup>[10-25]</sup>。

根据文献[1]第5.1.1条和文献[2]第6.1.2条可知:光伏电站安装的并网逆变器应满足额定有功出力下功率因数在超前0.95~滞后0.95的范围内动态可调,因此光伏逆变器在应供电调度部门要求参与电网无功电压调节时可存在两个不同的工况。由于电网常规特性可能更多地要求逆变器处于进相运行状态,即超前功率因数运行,逆变器既向系统发出有功又向系统发出无功,充当无功电源;而当电网负荷严重下降(如节假日停工停产高峰期),系统无功电源过剩导致PCC电压升高时,此时要求逆变器处于迟相运行状态,即滞后功率因数运行,逆变器向系统发出有功但从系统吸收无功,相当于用作无功负荷。

另根据文献[1]第5.1.2条和文献[2]第5.1.2条

可知:光伏电站应充分利用光伏逆变器的无功容量及调节能力。当光伏逆变器的无功容量不能满足电力系统调节需求时,光伏电站应加装集中无功补偿装置,包括并联电容器、并联电抗器、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止无功发生器(static var generator, SVG)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、同步调相机等。前二者单向补偿特性非常明显,后4者均具备双向补偿功能,可在电网电压偏低时发出无功、在电网电压偏高时吸收无功,即与光伏逆变器类似,可根据系统需要分别充当无功负荷和无功电源。

## 2 光伏无功负荷计算

### 2.1 汇流及并网线路的无功损耗

低压汇流电缆、中压并网电缆、中压并网架空线等线路的无功功率损耗,主要来源于线路感抗的无功损耗,其计算公式参见文献[3]式(7-3),此处稍作改动,公式为

$$\Delta Q_L = \frac{S^2}{U^2} X_L \quad (1)$$

式中: $\Delta Q_L$ 为线路无功功率损耗, Mvar;  $S$ 为线路末端视在功率, MVA;  $U$ 为线路末端节点电压, kV;  $X_L$ 为线路感抗,  $\Omega$ 。

### 2.2 升压变压器的无功损耗

由文献[3]第157页第(二)节相关内容可知,升压变压器的无功功率损耗可近似为绕组漏抗 $X_T$ 和铁心励磁支路电纳 $B_T$ 两部分的无功功率损耗组成,其中绕组漏抗损耗在变压器通过功率不变时与变压器端运行电压成反比,而铁心励磁损耗与运行电压成正比。在考虑运行电压情况下,变压器的无功损耗参考文献[3]式(7-2)计算,此处稍作改动,公式为

$$\Delta Q_T = \left[ \frac{U_N \% \left( \frac{\beta}{\gamma} \right)^2}{100} + \frac{I_0 \%}{100} \gamma^2 \right] S_N = \frac{S^2}{U^2} X_T + U^2 B_T \quad (2)$$

$$\beta = S/S_N \quad (3)$$

$$\gamma = U/U_N \quad (4)$$

式中: $\Delta Q_T$ 为变压器无功功率损耗, Mvar;  $S$ 为变压器负载容量, MVA;  $S_N$ 为变压器额定容量, MVA;  $\beta$ 为变压器负载系数,当变压器额定视在功率运行(满载)时,取 $\beta=1$ ;  $U$ 为变压器端运行电压, kV;  $U_N$ 为变压器端额定电压, kV;  $\gamma$ 为变压器电压系数,当变压器额定电压运行时,取 $\gamma=1$ ;  $U_k\%$ 为变压器短路阻抗百分数;  $I_0\%$ 为变压器空载电流百分数。

经过实际项目实践我们知道,变压器无功损耗

是光伏电站最主要的无功负荷,约占80%,而电缆和架空线路约各占10%。由于变压器 $U_k\%+I_0\%$ 一般接近10%,因此可行性研究和初步设计阶段,也可以按升压变压器额定容量的10%(一次升压)或20%(两次升压)估计光伏电站无功补偿容量。

### 2.3 逆变器迟相提供的无功负荷容量

当供电调度部门要求分布式光伏电站参与电网无功电压调节时,逆变器迟相运行提供的无功负荷容量可由下式计算

$$\Delta Q_1 = \Sigma P_1 \times \tan(\arccos \lambda_h) \quad (5)$$

式中: $\Delta Q_1$ 为逆变器迟相运行可用作无功负荷的容量,Mvar; $P_1$ 为逆变器满载额定有功功率,MW; $\lambda_h$ 为根据供电调度指令调节的本电站逆变器迟相(滞后)运行功率因数。

显然,依据文献[1]第5.1.1条,上式存在下面的边界条件

$$0.95 \leq \lambda_h \leq 1 \quad (6)$$

## 3 光伏无功电源计算

### 3.1 汇流及并网线路的充电功率

线路在运行过程中消耗感性无功功率,同时因对地电容的存在也会产生充电无功功率(容性),成为无功电源的一部分。对中压并网分布式光伏电站来说,这部分无功电源非常小,但如果电站存在较长距离的电缆时仍然不能予以忽略。其计算公式参见文献[3]式(7-5),此处稍作改动,公式为

$$\Delta Q_{LC} = \frac{U^2}{X_C} = \omega C U^2 \quad (7)$$

式中: $\Delta Q_{LC}$ 为线路充电无功功率,Mvar; $U$ 为线路平均运行电压,kV; $X_C$ 为线路容抗, $\Omega$ ; $\omega$ 为系统角频率, $\omega = 2\pi f$ ; $C$ 为线路对地正序电容,F。

### 3.2 逆变器进相提供的无功电源容量

当供电调度部门要求分布式光伏电站参与电网无功电压调节时,逆变器进相运行提供的无功电源容量(发出的无功功率)可由下式计算(式中为避免得到负值增加负号)

$$\Delta Q_{IC} = -\Sigma P_1 \times \tan(\arccos \lambda_q) \quad (8)$$

式中: $\Delta Q_{IC}$ 为逆变器进相运行可发出的无功功率容量,Mvar; $P_1$ 为逆变器满载额定有功功率,MW; $\lambda_q$ 为根据供电调度指令调节的本电站逆变器进相(超前)运行功率因数。

依据文献[1]第5.1.1条,上式存在下面的边界条件

$$-1 \leq \lambda_q \leq -0.95 \quad (9)$$

事实上,由于大范围电源进相容易对系统产生振荡事故,因此逆变器按供电调度指令进相(超前)运行须做好相应安全技术措施,经过经济技术方案比较后方可投入运行。

## 4 光伏系统无功平衡与补偿容量计算

按本文前述第2节、第3节的公式将分布式光伏电站中的无功负荷和无功电源都计算出来之后,即可对系统进行无功平衡。依据文献[4]第7.4条可知:接入10(6)kV~35kV电网的分布式电源,应具备系统率因数在超前0.98~滞后0.98范围内连续可调的能力,有特殊要求时,可做适当调整以稳定电压水平。假设分布式光伏电站计划投入容性无功补偿容量为 $Q_{cr}$ 、感性无功补偿容量为 $Q_{cg}$ ,则基于文献[4]第7.4条关于光伏电站功率因数规定的无功平衡论述见下文。

### 4.1 光伏电站折余自然无功负荷

一般地,将汇流线路、并网线路以及升压变压器的无功损耗的总和,称为自然无功负荷,用以区别光伏逆变器、无功补偿装置按运行要求提供的人工无功负荷。对中压并网分布式电站来说,汇流线路、并网线路产生的充电功率(也称为自然无功电源)非常小,因此为了简化计算,不妨将本光伏电站无功损耗扣除这部分自然无功电源之后部分,即本光伏电站自平衡后的自然无功负荷,定义为折余自然无功负荷,即取以上所有交流元件无功容量的代数和,按下面公式计算

$$\Delta Q_z = \Delta Q_L + \Delta Q_T - \Delta Q_{LC} \quad (10)$$

式中: $\Delta Q_z$ 为光伏电站折余自然无功负荷,Mvar; $\Delta Q_L$ 为线路无功功率损耗,Mvar; $\Delta Q_T$ 为变压器无功功率损耗,Mvar; $\Delta Q_{LC}$ 为线路充电无功功率,Mvar。

### 4.2 逆变器迟相无功平衡

此时分布式光伏电站系统呈感性,分担电网过剩无功电源,即逆变器根据调度指令用作无功负荷,光伏电站和光伏逆变器均滞后功率因数运行,功率因数和功率因数角正切值均为正值。因此,逆变器迟相时需要补偿的无功补偿容量及其性质主要取决于本光伏电站折余自然无功负荷和逆变器提供的无功负荷两者之和与电网运行要求本站提供的无功负荷之间的大小关系。

$$\Delta Q_h = (\Delta Q_z + \Delta Q_1) - \Sigma P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{sh}) \quad (11)$$

式中: $\lambda_{sh}$ 为根据供电调度指令调节的本电站系统迟相(滞后)运行功率因数。

依据文献[4]第7.4条,上式存在下面的边界

条件

$$0.98 \leq \lambda_{sh} \leq 1 \quad (12)$$

#### 1) 迟相须加装无功补偿的情况

逆变器迟相时需要补偿的容性无功补偿容量为本光伏电站折余自然无功负荷与逆变器提供的无功负荷之和超出电网运行要求本站提供的部分无功容量,而需要补偿的感性无功补偿容量为本光伏电站折余自然无功负荷与逆变器提供的无功负荷之和不足电网运行要求本站提供的部分无功容量(此处按习惯做法,无功电源取正、无功负荷取负,下同)。即

① 当  $\Delta Q_z + \Delta Q_l > \sum P_l \times \tan(\arccos \lambda_{sh})$  时,即  $\Delta Q_h > 0$ ,须加装容性无功补偿容量为

$$Q_{Cr}^{(1)} = \Delta Q_h \quad (13)$$

② 当  $\Delta Q_z + \Delta Q_l < \sum P_l \times \tan(\arccos \lambda_{sh})$  时,即  $\Delta Q_h < 0$ ,须加装感性无功补偿容量为

$$Q_{Cg}^{(1)} = -\Delta Q_h \quad (14)$$

对上述第①种情况逆变器高配无功负荷导致需要加装容性无功补偿装置反向补偿的做法,从经济技术和节能降耗的角度出发,这种方式没有效益。因此为避免反向补偿容性,光伏系统迟相时一般会要求

$$\lambda_h \geq \lambda_{sh} \quad (15)$$

而对上述第②种情况逆变器低配无功负荷,采用加装感性无功补偿装置补充,减轻光伏逆变器无功负荷输出压力的做法应当是合理可被接受的。但不管上述哪种方案,都是有悖于文献[2]第 5.1.2 条“光伏电站应充分利用逆变器的无功容量及其调节能力”这个技术要求的。

#### 2) 迟相无须加装无功补偿的情况

当逆变器迟相时本光伏电站折余自然无功负荷与逆变器提供的无功负荷之和恰好满足系统运行要求本站提供的无功负荷时,光伏电站无须加装无功补偿装置。

即当  $\Delta Q_z + \Delta Q_l = \sum P_l \times \tan(\arccos \lambda_{sh})$  时,有  $\Delta Q_h = 0$ ,将式(5)代入式(11)得到

$$\Delta Q_z + \sum P_l \times \tan(\arccos \lambda_h) = \sum P_l \times \tan(\arccos \lambda_{sh}) \quad (16)$$

求得

$$\lambda_h = \cos \left\{ \arctan \left[ \tan(\arccos \lambda_{sh}) - \frac{\Delta Q_z}{\sum P_l} \right] \right\} \quad (17)$$

目前市场上光伏逆变器功率因数  $\lambda_h$  的调节范围要远比光伏电站系统功率因数  $\lambda_{sh}$  大,因此根据上

式计算选择合适的本光伏电站逆变器迟相运行功率因数  $\lambda_h$ ,可以省去加装感性无功补偿装置的费用。

#### 4.3 逆变器进相无功平衡

分布式光伏电站系统呈容性须向电网发出无功功率,即逆变器根据调度指令用作无功电源,光伏电站和光伏逆变器均超前功率因数运行,功率因数和功率因数角正切值均为负值。因此,逆变器进相时需要补偿的无功补偿容量及其性质主要取决于扣除本光伏电站折余自然无功负荷之后光伏逆变器实际提供的无功电源与电网运行要求本站提供的无功电源之间的大小关系。令:

$$\Delta Q_q = (\Delta Q_{lc} - \Delta Q_z) + \sum P_l \times \tan(\arccos \lambda_{sq}) \quad (18)$$

式中:  $\lambda_{sq}$  为根据供电调度指令调节的本电站系统进相(超前)运行功率因数。

显然,依据文献[4]第 7.4 条,上式存在下面的边界条件

$$-1 \leq \lambda_{sq} \leq -0.98 \quad (19)$$

#### 1) 进相须加装无功补偿的情况

逆变器进相时需要补偿的感性无功补偿容量为扣除本光伏电站折余自然无功负荷之后光伏逆变器实际提供的无功电源超出电网运行要求本站提供的部分无功容量,而需要补偿的容性无功补偿容量为扣除本光伏电站折余自然无功负荷之后光伏逆变器实际提供的无功电源不足电网运行要求本站提供的部分无功容量。即

① 当  $\Delta Q_{lc} - \Delta Q_z > -\sum P_l \times \tan(\arccos \lambda_{sq})$  时,即  $\Delta Q_q > 0$ ,须加装感性无功补偿容量为

$$Q_{Cg}^{(2)} = \Delta Q_q \quad (20)$$

② 当  $\Delta Q_{lc} - \Delta Q_z < -\sum P_l \times \tan(\arccos \lambda_{sq})$  时,即  $\Delta Q_q < 0$ ,须加装容性无功补偿容量为

$$Q_{Cr}^{(2)} = -\Delta Q_q \quad (21)$$

同理,对上述第①种情况逆变器高配无功电源导致需要加装感性无功补偿装置反向补偿的做法,从经济技术和节能降耗的角度出发,这种方式没有效益。因此光伏系统进相时一般会要求

$$\lambda_q \leq \lambda_{sq} \Rightarrow |\lambda_q| \geq |\lambda_{sq}| \quad (22)$$

而对上述第②种情况逆变器低配无功电源,采用加装容性无功补偿装置补充,减轻光伏逆变器无功电源输出压力的做法应当是合理可被接受的。但不管上述哪种方案,都是有悖于文献[2]第 5.1.2 条“光伏电站应充分利用逆变器的无功容量及其调节能力”这个技术要求的。

## 2)进相无须加装无功补偿的情况

当扣除本光伏电站折余自然无功负荷之后光伏逆变器实际提供的无功电源恰好满足系统运行要求本站提供的无功电源时,光伏电站无须加装无功补偿装置。

当  $\Delta Q_{IC} - \Delta Q_Z = -\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{xq})$  时,即  $\Delta Q_q = 0$ ,将式(8)代入式(18)得到

$$-\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_q) - \Delta Q_Z = -\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{xq})$$

求得

$$\lambda_q = \cos \left\{ \arctan \left[ \tan(\arccos \lambda_{xq}) - \frac{\Delta Q_Z}{\sum P_1} \right] \right\} \quad (23)$$

目前市场上光伏逆变器功率因数  $\lambda_q$  的调节范围要远比光伏电站系统功率因数  $\lambda_{xq}$  大,因此根据上式计算选择合适的本光伏电站逆变器迟相运行功率因数  $\lambda_q$ ,可以省去加容量性无功补偿装置的费用。

## 4.4 不考虑逆变器参与电网调节的无功平衡

在个别地区供电部门不考虑利用逆变器无功电压调节能力,或者为稳定有功输出不考虑逆变器参与电网无功电压调节等情况下,则必须加装无功补偿装置以满足电网无功电压调节的要求。

### 1)电网调度要求光伏系统提供无功负荷

此时光伏电站滞后功率因数运行,系统呈感性,功率因数角正切值为正值。因此,需要加装的感性无功补偿容量为本光伏电站折余自然无功负荷不足电网运行要求本站提供的部分无功容量。公式为

$$-\Delta Q_Z - Q_{Cg}^{(3)} = -\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{sh})$$

即

$$Q_{Cg}^{(3)} = \sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{sh}) - \Delta Q_Z \quad (24)$$

### 2)电网调度要求光伏系统提供无功电源

此时光伏电站超前功率因数运行,系统呈容性,功率因数角正切值为负值。因此,需要加装的容性无功补偿容量为电网运行要求本站发出的无功功率和补偿本光伏电站折余自然无功负荷之和。公式为

$$-\Delta Q_Z + Q_{Cr}^{(3)} = -\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{xq})$$

即

$$Q_{Cr}^{(3)} = -\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{xq}) + \Delta Q_Z \quad (25)$$

## 4.5 光伏系统无功平衡通用计算公式

根据本文前面第4.2节、第4.3节、第4.4节的论述,可以得到中压并网分布式光伏电站无功平衡计划投入感性无功补偿容量  $Q_{Cg}$ 、容性无功补偿容

量  $Q_{Cr}$  的通用计算公式如下:

1)当电网电压偏高调度要求,光伏系统滞后功率因数运行吸收无功功率时,光伏电站需安装的感性补偿装置容量为

$$Q_{Cg} = \sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{sh}) - \sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_h) - \Delta Q_Z \quad (26)$$

由于  $\tan(\arccos \lambda)$  函数在  $(0, 1)$  区间单调递减,为避免出现反向补偿容性的现象造成内耗,此时一般会要求  $\lambda_h \geq \lambda_{sh}$ 。

当考虑逆变器调节能力时  $\lambda_h \neq 1$ ,此时  $\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_h) \neq 0$ ,  $Q_{Cg}$  就等于第4.2节的  $Q_{Cg}^{(1)}$ ,当不考虑逆变器调节能力时  $\lambda_h = 1$ ,此时  $\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_h) = 0$ ,  $Q_{Cg}$  就等于第4.4节第1)条的  $Q_{Cg}^{(3)}$ ,该公式可适用各种情况。

2)当电网电压偏低调度要求,光伏系统超前功率因数运行发出无功功率时,光伏电站需安装的容性补偿装置容量为

$$Q_{Cr} = -\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_{xq}) + \sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_q) + \Delta Q_Z \quad (27)$$

由于  $-\tan(\arccos \lambda)$  函数在  $(-1, 0)$  区间单调递增,为避免出现反向补偿感性的现象造成内耗,此时一般会要求  $\lambda_q \leq \lambda_{xq} \Rightarrow |\lambda_q| \geq |\lambda_{xq}|$ 。

当考虑逆变器调节能力时  $\lambda_q \neq -1$ ,此时  $\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_q) \neq 0$ ,  $Q_{Cr}$  就等于第4.3节的  $Q_{Cr}^{(2)}$ ,当不考虑逆变器调节能力时  $\lambda_q = -1$ ,此时  $\sum P_1 \times \tan(\arccos \lambda_q) = 0$ ,  $Q_{Cr}$  就等于第4.4节第2)条的  $Q_{Cr}^{(3)}$ ,该公式可适用各种情况。

## 5 光伏无功补偿装置选型与补偿容量配置

从本文第4.5节光伏系统无功平衡的通用计算公式得到如下结论:光伏电站需要投入的感性无功补偿容量  $Q_{Cg}$ ,实际上就是扣除电站折余自然无功损耗和光伏逆变器提供的无功功率之后不足电网要求系统提供的部分;而光伏电站需要投入的容性无功补偿容量  $Q_{Cr}$ ,实际上就是扣除光伏逆变器提供的无功功率之后不足电网要求系统提供和电站本身需要补偿的折余自然无功损耗之和的部分。

### 5.1 传统无功补偿装置

传统的无功补偿装置选型就是设置并联电容器组(capacitor bank, CB)和并联电抗器组(reactor bank, RB)。CB和RB单独装设的情况比较少,一般都是

组合为成套设备,即静止无功补偿器(SVC)。SVC 根据控制和投切元件的不同有多种类型,但其核心元器件本质就是 CB+RB(详见文献[3]第 159 页第(4)节相关内容),其他相关资料很多此处不再累述。

每套 SVC 或 CB+RB 补偿装置容量分别为

$$Q_{RB} = Q_{Cg} \quad (28)$$

$$Q_{CB} = Q_{Cr} \quad (29)$$

其中,CB 是目前普遍广泛使用的无功补偿设备,其优点是投资少、便于分散安装维护、补偿效果较好;缺点是占地面积较大、必须固定分组按步长投切且响应时间较长(约 0.1 s)。不管是 CB 还是 SVC,由于恒阻抗的特性,其出力与运行电压的平方成正比,因此在低电压时均存在无法提供足够无功支撑系统需求的问题。

由于 RB 投资低、运行维护简单,在容性无功过剩时可以降低并网点电压,是首选的感性无功补偿设备,但其在正常运行时也同样消耗大量无功功率,造成不必要浪费,这同样也是 SVC 的不足。

当电站对响应速度要求不及对经济性的要求时,可以考虑安装 SVC 或 CB+RB 补偿装置。

## 5.2 新型动态无功补偿装置

近年来,随着设备制造技术不断提高,出现了一种具备双向补偿的新型动态无功补偿装置,即静止无功发生器(SVG),这种设备摒弃了 CB+RB 的构造模式,采用全控型可关断电力电子元器件组成的自换相逆变器,并以小容量储能元件作为辅助,能够发出或吸收无功功率。一般地,单套动态无功补偿装置容量可按下式配置为

$$Q_{SVG} = \max\{Q_{Cr}, Q_{Cg}\} \quad (30)$$

显然,SVG 基于瞬时无功功率调节的补偿原理,成就了其连续控制、快速响应(约 10 ms)、损耗低的优点,性能较 SVC 更优,但由于其控制系统较为复杂、设备元件数量较多,比较 SVC 造价偏高、可靠性略差(详见文献[3]第 159 页第(4)节相关内容)。关于 SVG 的相关资料就更多了,此处不再累述。

当对响应速度要求较高,或是对 PCC 电能质量有特殊要求的场合,应考虑采用 SVG 补偿装置。

## 5.3 联合补偿方案

注意到,由于存在如下关系式

$$|\lambda_q| = \lambda_h \Rightarrow \tan(\arccos \lambda_q) = -\tan(\arccos \lambda_h) \quad (31)$$

$$|\lambda_{xq}| = \lambda_{sh} \Rightarrow \tan(\arccos \lambda_{xq}) = -\tan(\arccos \lambda_{sh}) \quad (32)$$

因此,当  $\lambda_q = -\lambda_h$  且  $\lambda_{xq} = -\lambda_{sh}$  时,代入式(26)、式(27),有

$$Q_{Cr} - Q_{Cg} = 2\Delta Q_z \quad (33)$$

说明当光伏逆变器在迟相、进相双向补偿所提供容量相同且双向补偿效果等价的条件下,容性补偿容量与感性补偿容量的差值为电站折余自然无功负荷的两倍。因此,如果按较大的  $Q_{Cr}$  选择单套 SVG 装置,那么 SVG 装置在感性容量侧将出现  $2\Delta Q_z$  的容量冗余无法被利用,造成资源的浪费。

本文建议采用较为经济的补偿方案为:采用 CB 和 SVG 联合补偿的形式,其中 SVG 补偿容量为  $Q_{Cg}$ ,而 CB 补偿装置容量为  $Q_{Cr}$ ,不能被 SVG 替代的部分,即每套补偿装置容量分别为

$$Q_{SVG} = Q_{Cg} \quad (34)$$

$$Q_{CB} = Q_{Cr} - Q_{Cg} = 2\Delta Q_z \quad (35)$$

采用 CB 和 SVG 联合补偿的形式,可以避免资源浪费,但须注意当 SVG 感性运行的时候,应对 CB 控制回路闭锁,防止同时投入。

## 5.4 无需感性补偿的特殊情形

当  $\lambda_h = \lambda_{sh} = 1$  且  $\lambda_q = \lambda_{xq} = -1$  时,即光伏电站不参与电网无功电压调节时;当  $\lambda_h = \lambda_{sh}$  且  $\lambda_q = \lambda_{xq}$  时,即光伏逆变器提供无功容量全部且恰好用于电网无功电压调节,折余自然无功损耗不参与电网无功电压调节也不需要逆变器进行补偿时,以上情况,代入式(26)、式(27),均可得到下式

$$Q_{Cg} = -\Delta Q_z \quad (36)$$

$$Q_{Cr} = \Delta Q_z \quad (37)$$

显然,上面二式是等效的,此时光伏电站不需要配置感性无功补偿,只需要补偿容性无功满足光伏电站折余自然无功负荷的平衡即可。这种情况只配置 CB 补偿装置,单套补偿装置容量为

$$Q_{CB} = \Delta Q_z \quad (38)$$

值得注意的是,由光伏逆变器全额出力来平衡电网无功需求的方案,虽然节约了投资无功补偿装置的费用,但是却增加了光伏逆变器无功输出的压力,当响应速度不足情况下有可能造成逆变器短时过载,从而缩减光伏逆变器的使用寿命,可能并不是最优的方案,需要结合项目实际情况进行分析。

## 6 光伏无功补偿谐波治理和安装位置选择

对安装 SVC 或 CB+RB 补偿装置的场景,当需要对投入电容器等产生的谐波进行消谐治理时,可以采用在 CB 回路串联电抗器的方式,一般在补偿回路串联 5% 或 12% 的电抗器抑制投入 CB 引起的 5 次或 3 次及以上的谐波电流,也可以采用有源滤波器

或谐波滤波器与CB联合补偿的方式。

对安装SVG装置的场景,因SVG内置桥式电路可以跟踪、消除逆变器产生的低次谐波,并对高次谐波也有一定程度的削弱作用,因此可以不需要再配置其他消谐设备。目前市场上的SVG基本上已实现模块化,设计过程中应当注意区别选用。

根据运行实践经验,建议存在以下几类情况时,应该考虑在升压变压器中压侧设置补偿装置的方式,除此之外仍可以采用升压变压器低压侧安装补偿装置的方式。

1)以升压变压器额定容量为基准,补偿系数超过30%;

2)用户中压侧安装有电机等中压负荷;

3)采用SVG补偿时,单套补偿装置容量超过1 Mvar。

## 7 结语

光伏电站参与电网无功电压调节,是由光伏逆变器和无功补偿装置通过提供无功功率共同作用完成的。在实际规划设计过程中,应合理考虑二者无功输出比例,根据经济技术方案,具体项目具体分析,采用本文提供的补偿容量计算和选型设计方法选择适合本项目的无功补偿方案,不应当主观化、绝对化。

另外,本文的论述是基于电网无功平衡的单目标控制模型做出的。如果考虑将PCC电压偏差也列入控制目标,须建立无功和电压协同控制的多目标控制模型,由于无功平衡和电压调节的各类参数相互关联、相互影响,其模型建立和求解都将非常复杂,有待下一步继续深入探讨和研究。

## 参考文献

- [1] 光伏发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.
- [2] 光伏发电站无功补偿技术规范:GB/T 29321—2012[S]. 2012.  
Technical specification for reactive power compensation of PV power station:GB/T 29321—2012[S]. 2012.
- [3] 中国电力工程顾问集团有限公司,中国能源建设集团规划设计有限公司. 电力工程设计手册-24-电力系统规划设计[M]. 北京:中国电力出版社,2019.
- [4] 分布式电源并网运行控制规范:GB/T 33592—2017[S]. 2017.  
Specification of operation and controlling for distributed resources connected to power grid:GB/T 33592—2017[S].

2017.

- [5] 马喜平,董晓阳,李亚昕,等. 考虑新能源接入的电网有功无功协调双层优化策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2024,40(1):137-142.  
MA Xiping,DONG Xiaoyang,LI Yaxin,et al. Research on the two-layer optimal strategy of active power and reactive power coordination considering integration of new energy [J]. Power System and Clean Energy, 2024,40(1):137-142.
- [6] 顾泰宇,孙丝萝,田野,等. 高比例分布式光伏并网无功电压控制方法综述[J]. 东北电力技术,2023,44(3):1-5.  
GU Taiyu,SUN Siluo,TIAN Ye,et al. Overview of reactive voltage control methods for high proportion distributed photovoltaic grid connection[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023,44(3):1-5.
- [7] 杜超凡,张蕾,孙崧强,等. I&I自适应的STATCOM与发电机励磁鲁棒协调控制[J]. 西安工程大学学报,2020,34(5):42-48.  
DU Chaofan,ZHANG Lei,SUN Songqiang,et al. I&I adaptive based robust coordinated control for STATCOM and generator excitation[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020,34(5):42-48.
- [8] 孙浩锋,章健,熊壮壮,等. 含风光储联合发电系统的主动配电网无功优化[J]. 电测与仪表,2023,60(2):104-110.  
SUN Haofeng,ZHANG Jian,XIONG Zhuangzhuang,et al. Reactive power optimization of active distribution network with wind-photovoltaic energy storage hybrid generation system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023,60(2):104-110.
- [9] 王文偉,谢丁,谢醉冰,等. 考虑集群划分的分布式光伏无功电压控制策略[J]. 浙江电力,2024,43(7):64-75.  
WANG Wenzhuo,XIE Ding,XIE Zuibing,et al. A reactive voltage control strategy for distributed PV based on cluster segmentation[J]. Zhejiang Electric Power, 2024,43(7):64-75.
- [10] 薛成,曹戈,王争冕,等. 基于鲸鱼群算法的交直流混联系统无功电压控制方法研究[J]. 电网与清洁能源,2023,39(9):67-73.  
XUE Cheng,CAO Ge,WANG Zhengmian,et al. Research on the reactive power and voltage control method for AC-DC hybrid systems based on the whale swarm algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2023,39(9):67-73.
- [11] 郭勇,李秋燕,马杰,等. 新基建负荷与光伏接入下配电网可开放容量评估及优化[J]. 电力工程技术,2023,42(6):64-73.  
GUO Yong,LI Qiuyan,MA Jie,et al. Evaluation and optimization of available capacity of distribution network under new infrastructure load and photovoltaic access[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(6):64-73.
- [12] 陈宇星,梁芙蓉,尤炜,等. 含分布式光伏的配电网模型预

- 测控制优化方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 100-109.  
CHEN Yuxing, LIANG Furong, YOU Wei, et al. Model predictive control optimization method for distribution network containing distributed photovoltaics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 100-109.
- [13] 李民, 杨暑森, 李科锋, 等. 覆雪状态下光伏发电功率预测方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 250-257.  
LI Min, YANG Shusen, LI Kefeng, et al. Research on power prediction method of photovoltaic power generation under snow coating conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 250-257.
- [14] 周猛. 光伏电站无功补偿运行方式优化研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(5): 22-26.  
ZHOU Meng. Research on optimization of reactive power compensation operation mode of photovoltaic power station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 22-26.
- [15] 徐志伟, 蔡晖. 220 kV 变电站无功补偿优化计算研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(4): 12-18.  
XU Zhiwei, CAI Hui. Study on reactive power compensation optimization computation of 220 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(4): 12-18.
- [16] 栗世玮, 张谦, 熊炜, 等. 含高渗透可再生能源的动态网络重构与无功电压调整协同优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 100-110.  
SU Shiwei, ZHANG Qian, XIONG Wei, et al. Coordination optimization of dynamic network reconfiguration and reactive power voltage regulation with high penetration renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 100-110.
- [17] 袁昌昊, 朱金大, 倪建富. 含分布式光伏的配电网双层协调电压优化方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 74-82.  
YUAN Changhao, ZHU Jinda, NI Jianfu. Coordinated voltage optimization method in distribution network with distributed photovoltaic[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 74-82.
- [18] 周良才, 周毅, 沈维健, 等. 基于深度强化学习的新型电力系统无功电压优化控制[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 182-189.  
ZHOU Liangcai, ZHOU Yi, SHEN Weijian, et al. Reactive voltage optimization control of novel power system based on deep reinforcement learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 182-189.
- [19] 欧阳森, 柯清派, 马文杰, 等. 基于虚拟电阻谐波抑制的光伏逆变器控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(4): 184-189.  
OUYANG Sen, KE Qingpai, MA Wenjie, et al. Study on PV grid-connected inverter control based on virtual resistance harmonic suppression[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2018, 39(4): 184-189.
- [20] 郭子辉, 吴军, 黄文鑫, 等. 考虑接入风险与无功配置的大用户接入规划方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 88-97.  
GUO Zihui, WU Jun, HUANG Wenxin, et al. A method of large user access planning considering access risk and reactive power allocation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 88-97.
- [21] 黄尚琪, 周羽生, 周文晴, 等. 基于储能和无功优化的直驱机组海上风电场低电压穿越策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 57-64.  
HUANG Xiaohui, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Low voltage ride through strategy of the D-PMSG offshore wind power farm based on energy storage and reactive power optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 57-64.
- [22] 汪自虎, 王文天, 惠慧, 等. 基于近邻成分分析与优化核极限学习机的光伏接入配电网漏电识别[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 203-211.  
WANG Zihu, WANG Wentian, HUI Hui, et al. Leakage recognition method of photovoltaic connected to distribution network based on neighborhood component analysis and optimized kernel extreme learning machine[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 203-211.
- [23] 王凯, 郑会奇. 浅谈 35 kV 及以下油浸式光伏发电用变压器的温升设计[J]. 变压器, 2023, 60(1): 8-10.  
WANG Kai, ZHENG Huiqi. Discussion on temperature rise characteristics of 35 kV and below oil-immersed photovoltaic transformers[J]. Transformer, 2023, 60(1): 8-10.
- [24] 朱训君, 王宾, 李海雨, 等. 基于改进粒子群算法的农村配电网分布式光伏选址定容研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 206-214.  
ZHU Xunjun, WANG Bin, LI Haiyu, et al. Study on distributed photovoltaic location and capacity selection of rural distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 206-214.
- [25] 梁晟杰, 邓鹏, 何萍, 等. 大规模分布式光伏接入配电系统雷击过电压特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2024(6): 85-91.  
LIANG Shengjie, DENG Peng, HE Ping, et al. Lightning overvoltage characteristics with large-scale distributed photovoltaic access to distribution system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(6): 85-91.

#### 作者简介:

张小聪(1982—),男,助理工程师,主要从事 35 kV 及以下配电网工程及新能源系统规划设计、校审等工作。E-mail: 2860776791@qq.com。