

高效率长寿命的混合型直流母线电容研究

倪峰¹, 李飞², 王倩¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安宝美电气工业有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 逆变器的直流母线通常使用电解电容器消纳开关过程中的瞬时能量, 在电网电压穿越时缓冲能量冲击。电解电容器必须降额使用以保证逆变器的寿命满足标准。针对这一问题, 深入研究了薄膜电容器与电解电容器混合使用的混合型直流母线电容。通过使用高性能的薄膜电容吸收纹波电流中的高频分量, 有效减小了电解电容器的温升, 从而提高了电解电容的寿命。仿真和实验结果有效地支持了这一结论。

关键词: 逆变器; 直流母线; 电解电容; 薄膜电容; 寿命

中图分类号: TM47 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20018

Research on Hybrid DC-Link Capacitor Bank with High Efficiency and Long-life Time

NI Feng¹, LI Fei², WANG Qian¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,

Shaanxi, China; 2. Bomay Electric Industries Company Limited,

Xi'an 710077, Shaanxi, China)

Abstract: Electrolytic capacitors are the common selection in inverters' DC-link for absorbing energy during switching transient and buffering power surge during grid ride-through. Electrolytic capacitors must be derating in order to accomplish the life time requirement of inverters. The hybrid DC-link capacitor bank which combines electrolytic capacitors and film capacitors were investigated for this issue. In the proposed hybrid DC-link capacitor bank, ripple currents were handled by the high-performance film capacitor, which leads to lower temperature rise in electrolytic capacitors, and life time of electrolytic capacitor extension is obtained. Simulation and experiments results effectively support this conclusion.

Key words: inverter; DC-link; electrolytic capacitor; film capacitor; life time

电压型变换器已经成为逆变器的标准电路拓扑, 广泛使用于风力发电、光伏发电、有源电力滤波器、静止无功发生器等各类并网电力电子应用中^[1-4]。电压型变换器的特点在于直流电压稳定^[1], 这是通过双极型绝缘栅晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 桥式开关网络与直流负荷或电源之间的直流母线电容实现的。直流母线电容用以消纳开关过程中的瞬时能量, 它的电容值较大, 以保证相对稳定的直流电压。除此之外, 在一些特殊应用中, 直流电容还需要存储足够的能量以保证逆变器在特殊工况下依然

保持并网运行, 并向电网做出相应的响应, 例如分布式发电中的电压穿越过程。

在逆变器中, 通常选择2种类型的电容^[2], 分别是电解电容和薄膜电容, 这2种电容器具有显著的特性差别。电解电容能量密度大, 纹波电流能力低; 薄膜电容恰恰相反, 能量密度较低但纹波电流能力较大^[5]。通常, 在逆变器的设计中, 单独选择电解电容器通过串并联组成直流母线电容, 以获得较大的直流母线电容量, 然而, 必须显著地降额使用, 以达到寿命的要求。也就是说, 为了达到寿命的要求, 必须使用更多的电解电

基金项目: 国家自然科学基金(51507135)

作者简介: 倪峰(1978—), 男, 硕士研究生, 讲师, Email: nifeng@xaut.edu.cn

容,这样一来,增加了逆变器的成本,也显著增加了逆变器的体积^[16-7]。

薄膜电容和电解电容组成的全新的混合型直流母线电容有效地解决了这一问题^[7]。混合型直流母线电容设计中,使用高性能的圆柱形薄膜电容器替换传统直流母线中的部分电解电容器。合理地配置薄膜电容和电解电容的组合,薄膜电容充分消纳纹波电流中的高频分量,用于缓冲短时间尺度上的能量交换;电解电容用于存储能量,用于支撑大时间尺度上的能量交换^[8-9]。这样一来,造成电解电容温升的高频纹波电流大部分被薄膜电容旁路,电解电容的温升就得到了明显降低,显著提高了电解电容的寿命。然而,在已有的研究中^[7],仅通过仿真描述了混合型直流电容所带来的优势,并没有给出设计的指导。

需要指出,混合型直流电容中对薄膜电容的使用方法类似于信号电路中的旁路电容^[8],然而,只有在上百千瓦的大功率应用中使用高性能薄膜电容器才能实现旁路高频纹波电流的作用。除此之外,通过合理地设计直流母线与IGBT半桥的互连结构,使用高性能的薄膜电容还能够取代安装在IGBT模块上的吸收电容。这得益于高性能薄膜电容自身的低等效串联电感。

1 纹波电流分析

在电力电子应用中,术语“纹波电流”(ripple current)被用于定义直流母线电容^[9]。电容器的数据手册通常仅提供单一频率(120 Hz或100 Hz)的纹波电流值,然而,实际的纹波电流具有广泛的频谱。为了优化设计混合直流电容的组合形式,在Simplis中搭建了三相逆变器的仿真电路模型,如图1所示,用以获得纹波电流频谱与调制方式、开关频率和开关时间的关系。模型按照250 kW逆变器搭建,SPWM的开关频率设为2 250 Hz,调制比为0.9。

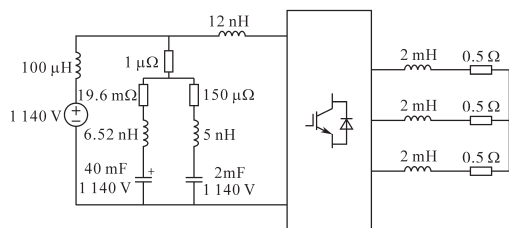


图1 仿真电路示意图

Fig.1 Circuit diagram in simulation

电路仿真得到直流母线电容的电流,对直流母线电流进行频谱分析,即得到了造成电解电容温升的原因。这样一来,直流母线电容的电流频谱就可以表征出直流母线电容的温升水平。

直流母线单独使用40 mF电解电容的仿真结果如图2灰线所示,此时,纹波电流全部流进电解电容。额外并联2 mF高性能薄膜电容器(SB-Electronics, SBE公司的Power Ring Film Capacitor)后的仿真结果如图2黑线所示,所增加的2 mF电容器为直流纹波电流提供了新的通路,特别是其中的高频分量。

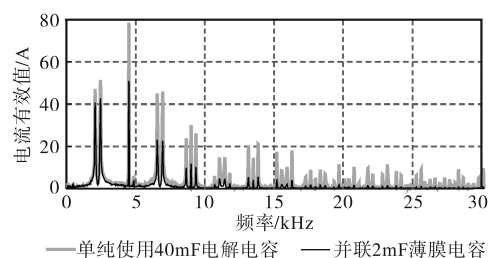


图2 电解电容纹波电流频谱比较

Fig.2 Electrolytic capacitors' ripple current spectrum comparison

图3为阻抗对比图,从图中可以明显地看出,在4 kHz以下的低频段,电解电容的阻抗小于薄膜电容;4 kHz以上的高频段,薄膜电容的阻抗明显小于电解电容。这样一来,对应图2的纹波电流频谱分析结果,直流母线中的纹波电流将主要流过薄膜电容,从而实现了显著降低电解电容温升的目的。

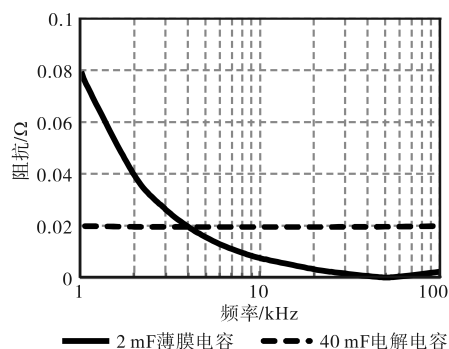


图3 阻抗对比图

Fig.3 Impedance comparison

在电解电容旁边并联2 mF薄膜电容后,仅有43%的电流纹波流进电解电容,电解电容器的纹波电流有效值从175 A降低到103 A,所产生的损耗仅为原先的1/3(相应地,电解电容的温升也会显著降低)。这样一来,增加了2 mF薄膜电容后,电解电容的寿命就得到了显著的提升。

2 混合型直流母线设计

相对于电解电容,薄膜电容的交流阻抗更低,混合型直流母线电容正是利用这一特性,通过在电解电容旁并联薄膜电容,将主要的高频纹波电流从电解电容分流到薄膜电容上,因此,电解电容的寿命因为损耗的降低而显著提升。与此同时,薄膜电容的损耗因数远低于电解电容,这样一来,尽管大量的纹波电流由薄膜电容承担,但是薄膜电容的损耗也不显著。

图2的灰色线表示了直流电容的电流频谱分析,可以看出,最主要的频率分量在开关频率的2倍处,即4 500 Hz。在这个频率处的纹波电流加入2 mF薄膜电容后,从79 A降到了51 A,降低了35%,对应的损耗也降低为原先的42%,接近总的电解电容损耗降低。尽管流过直流母线电容的纹波电流具有广泛的频谱,但是,从最主要的频率分量入手设计混合型直流母线电容,是一个可取的工程设计思路。

电容器的阻抗 Z 的计算公式如下式所示:

$$Z(f) = ESR + j2\pi f \times ESL + \frac{1}{j2\pi f \times C} \quad (1)$$

其中,电容器采用等效串联电阻(equivalent series resistor, ESR)、等效串联电感(equivalent series inductor, ESL)和电容 C 串联组成的等效电路模型。从式(1)中可以看到,在低频段,电容器表现为电容的频率特性,在高频段,电容则表现出电感的频率特性。高频段和低频段以谐振频率划分,电容的谐振频率 f_0 由下式所示:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{ESL \times C}} \quad (2)$$

电解电容器的谐振频率典型值为10 kHz,性能更优越的薄膜电容器的谐振频率典型值可以高达50 kHz。

通过设置特征频率点的纹波电流分配就可以计算出所需的电解电容和薄膜电容的容量。这个比例值强烈依赖于设计所关心的其他参数,例如体积、重量和成本,考虑以上参数的最优设计已然超出了本文的研究范围,本文推荐设置特征频率处电解电容和薄膜电容的阻抗比为2:1。也就是说,2倍开关频率处的纹波电流,有1/3流入电解电容。

计算2倍开关频率处的电解电容和薄膜电容的阻抗,如下式所示:

$$Z_{2,x} = |ESR_x + j\omega_2 \times ESL_x + \frac{1}{j\omega_2 \times C_x}| \quad (3)$$

其中

$$\omega_2 = 2\pi \times 2f_{sw}$$

式中: ω_2 为2倍开关频率的角频率; f_{sw} 为开关频率;下标 x 为E表示电解电容,下标 x 为Film表示薄膜电容。

相应地,电解电容和薄膜电容的容值可以根据下式计算:

$$Z_{2,E}/Z_{2,Film} = 2/1 \quad (4)$$

3 实验与分析

以250 kW逆变器为例说明混合型直流母线电容的设计和优化方法。假设直流母线电压为1 000 V,直流母线电容需要提供的纹波电流有效值为400 A。这样一来,混合型直流母线电容的电解电容部分需要由3个500 V的电解电容串联组成基本单元,并联的基本单元数量由纹波电流值和电压穿越所要求的电容值决定。使用电容值为5.4 mF、额定纹波电流为20 A的电解电容标准品,则单独使用电解电容来提供400 A纹波电流就需要20个基本单元,共60个电解电容组成直流母线电容,总的电容值为36 mF。

给上述逆变器的直流母线电容加入并联的薄膜电容,使用前文所述的仿真分析方法对电解电容和薄膜电容的损耗进行仿真分析。其中,逆变器的PWM控制信号保持不变,开关频率仍然设置在2 250 Hz。共使用了4种组合进行实验,编号0的直流母线电容组合为仅使用电解电容的直流母线电容,其组成形式如上文所述,共使用20个基本单元并联,实现总的电容值为36 mF。编号1的混合型直流母线电容组合为36 mF的电解电容并联1.5 mF的薄膜电容。编号2和编号3的混合型直流母线电容组合保持1.5 mF薄膜电容不变,减少并联的电解电容基本单元数为15和10,分别对应27 mF电解电容并联1.5 mF薄膜电容的组合编号2的混合型直流母线电容和18 mF电解电容并联1.5 mF薄膜电容的组合编号3的混合型直流母线电容。具体的参数罗列于表1中。

为了深入研究混合型直流母线电容的寿命,首先对流过电解电容器和薄膜电容器的纹波电流有效值进行统计,纹波电流是造成温升的根本原因,是影响直流母线电容寿命的主要因素。电解电容器和薄膜电容器的总纹波电流有效值的

对比结果如图4所示。可以看到,相比单纯使用电解电容的情形,在所有的混合型直流母线电容中,电解电容的纹波电流有效值都得到了大幅减小,减小了约1/3,分别是36%,43%和53%。

表1 用于实验的混合型直流母线电容组合的参数列表

Tab.1 List of parameters of hybrid DC capacitor bank configurations in experiments

组合编号	基本单元数量	电解电容容值/mF	薄膜电容容值/mF
0	20	36	0
1	20	36	1.5
2	15	27	1.5
3	10	18	1.5

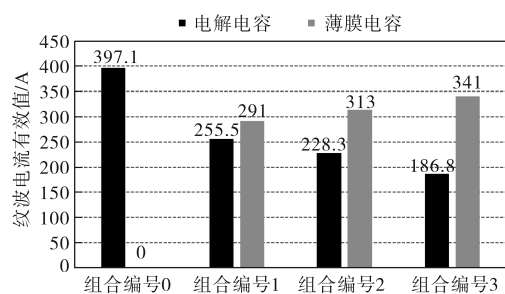


图4 电解电容器和薄膜电容器的总纹波电流有效值的对比结果

Fig.4 Total ripple current RMS value comparison between electrolytic capacitors and film capacitors

相应地,得到了4种组合中电解电容总损耗的结果,如图5所示。可以看到,采用混合型直流母线电容,电解电容减少了超过50%的损耗,对应3种混合型直流母线电容,分别减少了59%,56%和56%。图5中也罗列了薄膜电容的损耗,可以看到,因为薄膜电容器具有更低的等效串联电阻,尽管消纳了更多的纹波电流,但是所产生的损耗却微乎其微。

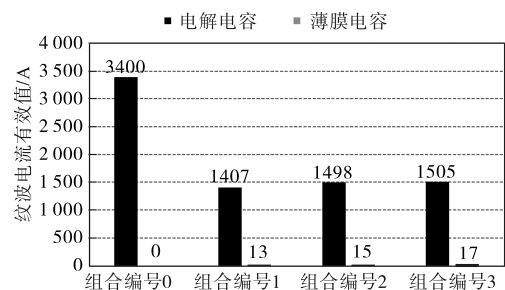


图5 不同组合下,电解电容器和薄膜电容器的损耗比较

Fig.5 Loss comparison of electrolytic capacitors and film capacitors with different configurations

最后,对比了4种情况下电解电容基本单元的纹波电流有效值,如图6所示。从图中可以清

楚地看到,采用混合式直流母线电容,在把电解电容减少为传统方案(即组合编号0)的50%时,流过每个电解电容基本单元的纹波电流依然处于20 A额定电流以内,并且,小于传统方案中每个电解电容基本单元的纹波电流有效值,从19.9 A降低到18.7 A。这就说明,混合式直流母线电容尽管使用了价格更为昂贵、能量密度更低的薄膜电容,但是由于少量的薄膜电容的加入即可替代大量的电解电容,因此能够维持直流母线电容的成本和体积。

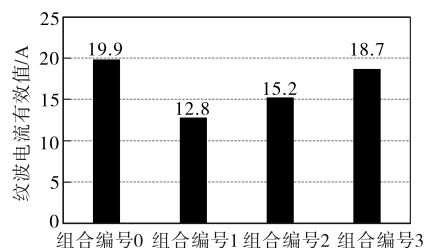


图6 并联电解电容器中单个电解电容支路的纹波电流有效值比较

Fig.6 Ripple current RMS value comparison of single electrolytic capacitor branch in paralleled electrolytic capacitor bank

以上的分析结果可以证明,混合型直流母线电容可以在维持成本和体积的前提下,提高直流母线电容的寿命。换句话说,提高了寿命即降低了逆变器的总体拥有成本。

搭建250 kW逆变器,对组合编号3的混合型直流母线电容进行实验研究。实验平台如图7所示。流过电解电容的电流波形如图8所示,流过薄膜电容的电流波形如图9所示。可以清楚地看到,薄膜电容承担了更多的纹波电流,起到了降低电解电容损耗、提高电解电容寿命的作用。

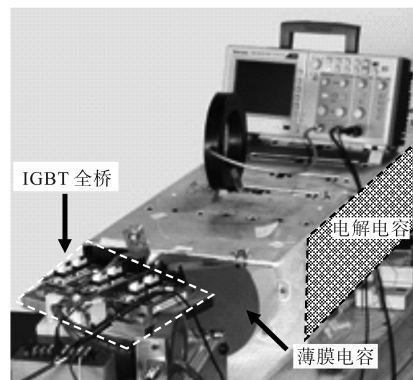


图7 250 kW逆变器实验平台照片

Fig.7 Photo of the 250 kW inverter experimental platform

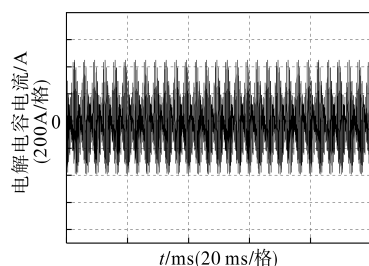


图8 电解电容器的纹波电流实验波形

Fig.8 Experimental ripple current waveform in electrolytic capacitors

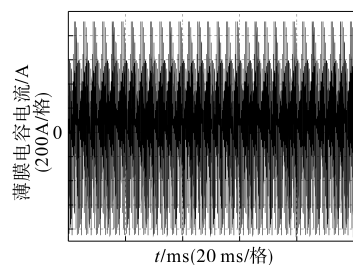


图9 薄膜电容器的纹波电流实验波形

Fig.9 Experimental ripple current waveform in film capacitors

为了进一步说明混合型直流母线电容器在损耗性能上的提升,通过单次脉冲实验,对混合型直流母线电容的电流时域波形进行了研究。依然利用前文的250 kW逆变器对组合编号3的混合型直流母线电容进行研究。

利用三相逆变器的一个半桥桥臂,在直流母线正端和半桥中点之间接入电阻丝。实测发现,等效阻抗约为 $1\ \Omega$ 电阻串联 $1\ \mu\text{H}$ 电感。实验中,使用市电经过二极管整流桥将混合型直流母线充电到约300 V;随后,断开市电与混合型直流母线,保持半桥上管关断的情况下,对半桥下管施加单次脉冲,完成一次开关。设置单次脉冲宽度为 $100\ \mu\text{s}$ 。所得到的电容电流波形如图10和图11所示。

图10为单独使用 $18\ \text{mF}$ 电解电容的实验结果,可以看到,电解电容提供所有的负载电流,计算可得电解电容的电流有效值为 $163.9\ \text{A}$ 。图11为 $18\ \text{mF}$ 电解电容并联 $1.5\ \text{mF}$ 薄膜电容的混合型直流母线电容中,电解电容的电流波形和薄膜电容的电流波形。可以看到,在半桥下管导通的 $100\ \mu\text{s}$ 的前 $20\ \mu\text{s}$,负载电流主要由薄膜电容提供,这是由于薄膜电容的阻抗更小。半桥下管关断后,由于薄膜电容释放了更多的能量,电解电容向薄膜电容充电以达到电压平衡,此时,可以看到2条电流曲线相对于时间轴对称。对电流的有效值进行计算和分析发现,在半桥下管导通的

$100\ \mu\text{s}$ 内,单独使用电解电容时,电解电容的电流有效值为 $283.5\ \text{A}$,混合型直流母线电容中电解电容的电流有效值为 $231\ \text{A}$,降低了19%,相应地,损耗也就降低了19%。半桥下管关断后,混合型直流母线电容中的电解电容和薄膜电容要进行电荷平衡,这个过程中,电解电容也会产生损耗,在 $300\ \mu\text{s}$ 的时间尺度内分别计算了2种情况下电解电容的电流有效值,发现混合型直流母线电容的电流有效值为 $143.5\ \text{A}$,单独使用电解电容时为 $163.9\ \text{A}$,减小了12%。这就说明,即使计算上电荷平衡过程所产生的损耗,混合型直流母线电容依然损耗更低,寿命更有优势。除此之外,还对 $100\ \mu\text{s}$ 单次脉冲过程中的负载电流有效值进行了计算,发现使用混合型直流母线电容时,负载电流有效值从 $163.9\ \text{A}$ 增加到了 $165.7\ \text{A}$,这也就是说,使用混合型直流母线电容可以增加单次脉冲中负载吸收的能量,这也是得益于薄膜电容的加入对直流母线电容阻抗的影响,得以改变负载电流的变化率,达到了增加能量传输的效果。

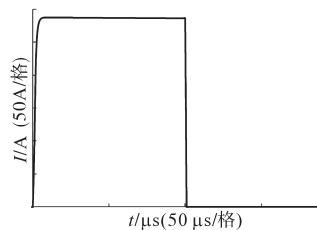


图10 单独使用电解电容时的电解电容电流波形

Fig.10 Current waveform of capacitors with only electrolytic capacitors

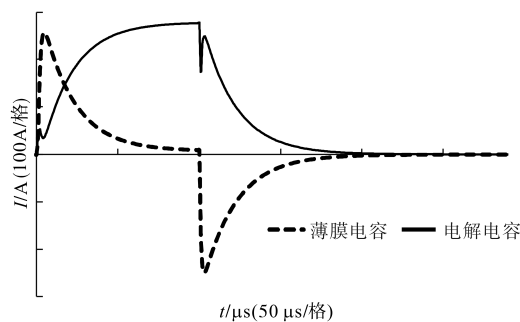


图11 混合型直流母线电容中的电流波形对比

Fig.11 Current waveforms of capacitors in hybrid DC-link capacitor bank

4 结论

在逆变器的直流母线电容中,从特定的着眼点入手,合理地组合现有电容技术可以发掘出性能最优的混合型直流母线电容。本文正是从这一思路出发,以寿命、损耗为着眼点,利用现有的

薄膜电容器和电解电容器组成了混合型直流母线电容,实现了损耗的降低和寿命的提升,并且维持了成本和体积。使用仿真结合充分的实验对混合型直流母线电容进行了详尽的研究,研究结果证明:合理组合电解电容和薄膜电容,能够将电解电容的损耗降低超过50%,以达到显著提升直流母线电容寿命和降低逆变器总体拥有成本的效果。

参考文献

- [1] Erickson R W, Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics[M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [2] 苏宁焕. 基于CAN总线的模块化UPS并联控制策略[J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(6): 691-696.
- [3] Garcia-Rojo R, Olalla D. DC Link Capacitors for Industrial Applications[C]// Proceedings of CARTS Europe 2008, Helsinki, Finland, 2008.
- [4] Li Ming, Wang Y, Fang X, *et al.* Performance Evaluation of Two High Precision Distributed Series Compensator Control [C]//IEEE Energy Conversion Congress & Exposition, Raleigh, NC, USA, 2012.
- [5] Li Ming, Wang Y, Fang X, *et al.* On High Precision Distributed Series Compensator Control in Static Reference Frame [C]//International Power Electronics and Motion Control Conference, Harbin, China, 2012.
- [6] Sawyer E D. Low Inductance-low Temp Rise DC Bus Capacitor Properties Enabling the Optimization of High Power Inverters[C]// Proceedings of PCIM 2010, Nuremberg, Germany, 2010.
- [7] Brubaker M A, Hosking T A, Von Kampen T F. Life Testing of High-value Annular Form Factor DC Link Capacitors for Applications with 105 °C Coolant[C]//Proceedings of PCIM 2011, Nuremberg, Germany, 2011.
- [8] Brubaker M A, Hage D El, Hosking T A, *et al.* Increasing the Life of Electrolytic Capacitor Banks Using Integrated High-performance Film Capacitors[C]//Proceedings of PCIM 2013, Nuremberg, Germany, 2013.
- [9] Weir S. Bypass Filter Design Considerations for Modern Digital Systems, a Comparative Evaluation of the Big V, Multipole, and Many Pole Bypass Strategies[C]//DesignCon East 2005, Santa Clara, USA, 2005.
- [10] McGrath Brendan Peter, Holmes Donald Grahame. A General Analytical Method for Calculating Inverter DC-link Current Harmonics[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1851-1859.

收稿日期:2019-03-10

修改稿日期:2019-05-22