

无刷直流励磁同步电机启动控制策略研究

彭勃,张定华,刘浩平

(株洲中车时代电气股份有限公司,湖南 株洲 412001)

摘要:针对无刷直流励磁同步电机启动过程的特殊性,提出了一种新的高性能启动控制方法。在分析同步电机异步启动等效电路模型的基础上,建立了不同速度段矢量控制模型(异步启动和整步运行矢量控制模型),并提出了不同控制模型的平滑切换控制策略,实现整个启动和整步运行阶段的高性能矢量控制。实验结果表明上述控制策略具有有效性,并可实现无刷直流励磁同步电机带载快速、平稳的启动,具有较大的实用价值。

关键词:无刷直流励磁同步电机;异步启动;矢量控制

中图分类号:TM921 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19513

Research on the Starting Control Strategy of Brushless Synchronous Motor with DC Excitation

PENG Bo, ZHANG Dinghua, LIU Haoping

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China)

Abstract: Aiming at the particularity of the starting process of brushless synchronous motor with DC excitation, a new high-performance starting control method was proposed. On the basis of analyzing the equivalent circuit model of synchronous motor asynchronous in starting process, a vector control model of different speed sections, which including vector control model of asynchronous starting and synchronization running was established. A smooth switching control strategy with different control models was also proposed to complete the high performance vector control in the whole starting and running process. The experiment results indicate that the control strategy is effective and can realize fast and stable starting of brushless synchronous motor with DC excitation, and it has great practical value.

Key words: brushless synchronous motor with DC excitation; asynchronous start; vector control

同步电机根据励磁方式分为有刷和无刷等形式。无刷直流励磁同步电机由于取消了电刷和集电环,可避免火花产生,既简化了操作及维护,又减少了电刷粉尘对电机绝缘的危害,大大提高了电机的整体可靠性,因而在石油、化工、煤矿等具有爆炸性环境及要求长时间高可靠性运行的场合有着广泛的应用。同步电机启动方式有两种:一种先投励,后同步启动;另一种是先异步启动,后投励牵入同步。高性能的同步电机矢量控制或直接转矩控制都建立在同步启动方式上。普通有刷同步电机在启动时,整个励磁磁通已经建立,而无刷直流励磁装置在同步电机启动时不能提供任何励磁电流,无法建立励磁磁通,因此只能采用异步启动方式,其启动也是应用的难点。无刷直流励磁同步电机传统采用励磁绕组串接电阻的工频启动方式,启动电流大,整步

瞬间电流冲击剧烈,容易导致电机绕组温升过高而损坏绝缘强度。文献[1-2]提出一种采用变频启动方式能减小启动电流,但采取常规UF开环控制方式启动带载能力不强,投励整步过程机电震荡严重,存在启动失败的可能。文献[3-4]提出频率自控式矢量控制启动方法,但所涉及的同步电机励磁系统做了结构调整,增加了辅助启动的单相交流励磁绕组,方法不适用于普通无刷直流励磁同步电机。

因励磁系统具有特殊性,无刷直流励磁同步电机只能采取异步启动方式,普通有刷同步电机的矢量控制或直接转矩控制策略无法直接使用。本文通过分析同步电机异步启动过程等效电路,建立无刷直流励磁同步电机不同速度段矢量控制模型(异步启动矢量控制模型和整步运行矢量控制模型),实现不同闭环矢量控制策略的平滑

基金项目:湖南省重点领域研发计划项目(2019GK2161)

作者简介:彭勃(1980—),男,硕士,高级工程师,Email:pengbo@csrzc.com

切换,完成整个启动和整步运行过程的闭环矢量控制。通过实验验证表明,该控制策略启动电流小,具有启动迅速、整步平稳、带载能力强等优点,在无刷直流励磁同步电机的变频调速领域具有较好的应用前景。

1 无刷直流励磁同步电机简介

无刷直流励磁同步电机及励磁系统结构原理如图1所示,其与普通有刷同步电机的主要区别在于励磁系统,无刷直流励磁系统主要包括静态励磁装置、交流励磁机、旋转整流器及灭磁电阻(亦作为启动电阻)等部分^[5]。

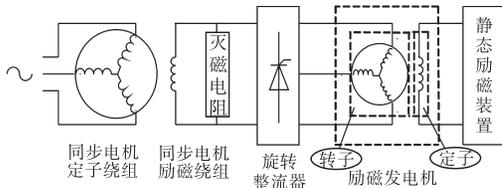


图1 无刷直流励磁同步电机励磁装置原理图

Fig.1 Diagram of brushless synchronous motor with DC excitation

同步电机启动时,先把转子绕组通过灭磁电阻短接,然后把定子绕组接通三相交流电源。依靠定子旋转磁场和转子绕组中感应电流所产生的异步电磁转矩,电机旋转起来。与同步电机转子同轴安装的灭磁电阻、旋转整流器、励磁机也同步旋转。静止励磁装置向励磁发电机的定子输入直流电流,由于励磁发电机发出电压与电机转速和励磁发电机定子电流的乘积近似成正比,在启动初期转速较低,励磁发电机发出电压亦低,旋转整流器无法工作,同步电动机将无法获得励磁电流;当电机转速高于最低转速后,励磁机转子绕组发出的三相交流电压将超过旋转整流器最低工作电压,整流桥开始将交流电压整流后供给同步电机转子绕组,产生励磁电流。调节励磁机定子电流,就可使励磁发电机转子所产生的三相交流电压得到调整,从而改变同步电机励磁绕组的励磁电流。

2 无刷直流励磁同步电机启动控制策略

由上述分析可知,与有刷同步电机可以同步启动不同,无刷直流励磁同步电机只能异步启动,因此高性能的同步电机矢量控制或直接转矩控制无法直接应用于无刷直流励磁同步电机,需要对无刷直流励磁同步电机的高性能启动控制进行研究。

2.1 同步电机异步启动数学模型分析

同步电机在转子 $d-q$ 旋转坐标系下的电压、磁链方程分别为^[6-7]

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s i_{sd} + p \Psi_{sd} - \omega_s \Psi_{sq} \\ U_{sq} = R_s i_{sq} + p \Psi_{sq} + \omega_s \Psi_{sd} \\ U_f = R_f i_f + p \Psi_f \\ 0 = R_{Dd} i_{Dd} + p \Psi_{Dd} \\ 0 = R_{Dq} i_{Dq} + p \Psi_{Dq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_{sl} i_{sd} + L_{ad} (i_{sd} + i_f + i_{Dd}) \\ \Psi_{sq} = L_{sl} i_{sq} + L_{aq} (i_{sq} + i_{Dq}) \\ \Psi_f = L_{fl} i_f + L_{ad} (i_{sd} + i_f + i_{Dd}) \\ \Psi_{Dd} = L_{Ddl} i_{Dd} + L_{ad} (i_{sd} + i_f + i_{Dd}) \\ \Psi_{Dq} = L_{Dql} i_{Dq} + L_{aq} (i_{sq} + i_{Dq}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{sd}, U_{sq}, U_f 分别为定子绕组 d, q 轴电压、励磁绕组电压; $i_{sd}, i_{sq}, i_f, i_{Dd}, i_{Dq}$ 分别为定子绕组 d, q 轴电流,励磁电流,阻尼绕组 d, q 轴电流; R_s, R_f, R_{Dd}, R_{Dq} 分别为定子电阻、励磁电阻、阻尼绕组 d, q 轴电阻; $L_{sl}, L_{fl}, L_{Ddl}, L_{Dql}$ 分别为定子绕组漏感、励磁漏感、阻尼绕组 d, q 轴漏感; L_{ad}, L_{aq} 分别为 d, q 轴电枢反应电感; $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{Dd}, \Psi_{Dq}$ 分别为定子绕组 d, q 轴磁链、励磁磁链、阻尼绕组 d, q 轴磁链; ω_s 为同步转速; p 为微分算子。

由同步电机电压和磁链方程可得 $d-q$ 坐标系下的等效电路如图2所示。

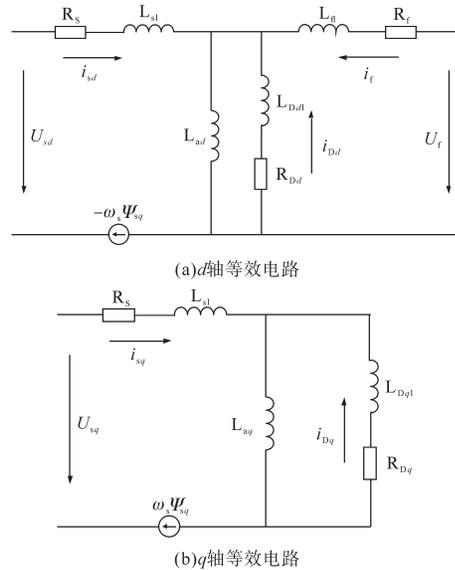


图2 同步电机等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of synchronous motor

在同步电机异步启动的过程中包括四个转矩^[8]:励磁回路短接形成的单轴转矩;阻尼绕组形成的异步转矩;凸极转子 d, q 轴磁阻不等形成的磁阻转矩;励磁后形成的同步转矩。其中转子凸

极结构和投励产生同步转矩,使转子牵入同步; 阻尼绕组和励磁绕组产生异步转矩,在转子励磁建立前驱动电机旋转。在启动初期励磁绕组经灭磁电阻短接,单轴转矩和凸极结构引起的同步转矩作用可以忽略,电机主要由阻尼绕组产生的异步转矩来加速。同步电机异步启动时,同步电机的定子等效为异步电机定子,同步电机的阻尼绕组等效为异步电机的转子绕组,与感应电机类似,定子绕组通入三相交流电压,定子旋转磁场将在转子阻尼绕组产生感应电流,其与定子旋转磁场相互作用产生异步电磁转矩。由此可得如图3所示的同步电机异步启动时的近似等效电路图。

图3中 $L'_{Dd1}, L'_{Dq1}, R'_{Dd1}, R'_{Dq1}$ 可等效为异步电机转子漏感和电阻, $-(\omega_s - \omega_r) \Psi'_{rq}, (\omega_s - \omega_r) \Psi'_{rd}$ 可等效为异步电机的转子感应电势。

待转速上升到励磁机最小工作转速时,将励磁绕组换接到励磁电源,使转子建立励磁磁场,这样依靠定、转子磁场相互作用产生同步转矩,再加上转子凸极效应引起的磁阻转矩,使转子转速达到同步。与此同时,由阻尼绕组产生的异步转矩也会随着迁入同步逐渐衰减为零,启动过程结束。

2.2 无刷直流励磁同步电机启动控制策略

根据上述同步电机异步启动过程近似等效电路,研究建立无刷直流励磁同步电机不同速度段矢量控制模型(异步启动矢量控制模型和整步

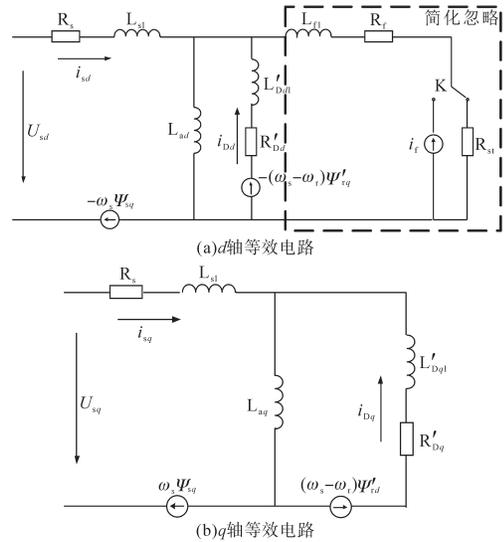


图3 同步电机异步启动近似等效电路图
Fig.3 Approximate equivalent circuit diagram of synchronous motor starting asynchronously

运行矢量控制模型),实现不同闭环矢量控制策略的平滑切换,完成整个启动及运行阶段的闭环矢量控制。图4为本文提出的无刷直流励磁同步电机无速度矢量启动控制框图。

2.2.1 异步启动矢量控制过程

在开始启动和较低转速段,无刷直流励磁装置无法工作,同步电机的磁场由变频器供电的定子励磁电流提供,变频器通过异步电机模型矢量控制策略驱动同步电机工作在异步启动阶段。

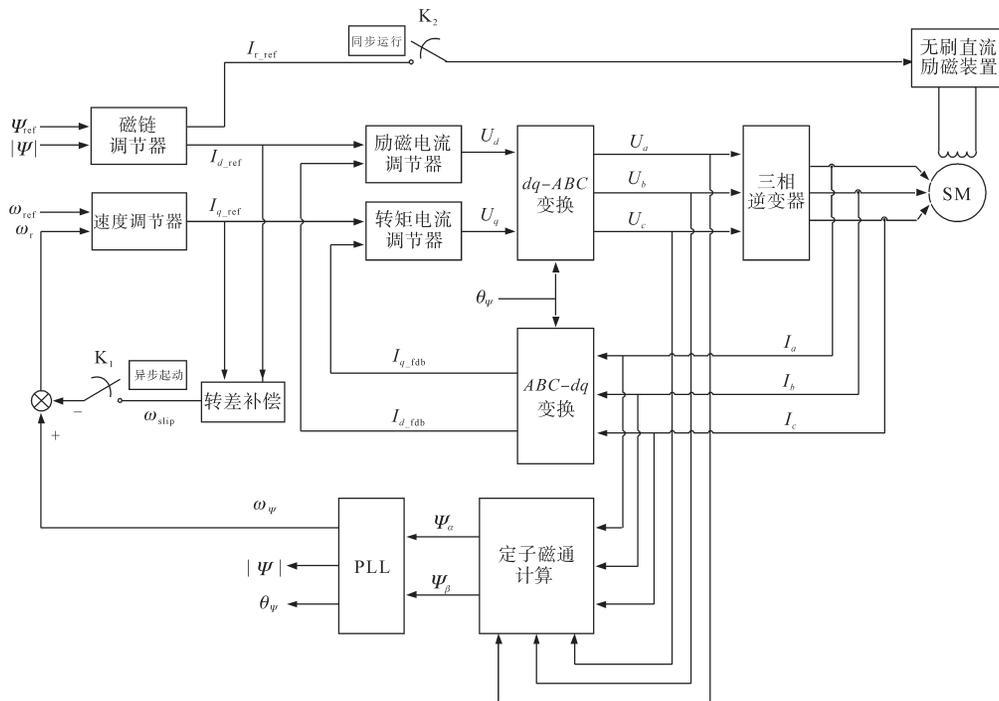


图4 无刷直流励磁同步电机启动控制框图

Fig.4 Starting control block diagram of brushless synchronous motor with DC excitation

1) 定子磁通计算模块根据电机参数及三相参考电压 U_a, U_b, U_c 和三相定子电流 I_a, I_b, I_c 等采集值计算出定子磁通幅值 $|\Psi|$ 、位置 θ_ψ 和角速度 ω_ψ 。

2) I_a, I_b, I_c 经矢量变换得到定子电流转矩分量反馈值 I_{q_fdb} 和定子电流励磁分量反馈值 I_{d_fdb} 。

此过程 K_2 开路, 设定磁链 Ψ_{ref} 与反馈磁链幅值 $|\Psi|$ 进入磁链调节器中控制, 励磁调节器将调节控制量全部分配给定子电流励磁分量设定值 I_{d_ref} , 进行定子绕组励磁, 如下式所示:

$$\begin{cases} I_{d_ref} = K_\psi (K_{p_\psi} + K_{i_\psi}/s) (\Psi_{ref} - |\Psi|) \\ I_{r_ref} = (1 - K_\psi) (K_{p_\psi} + K_{i_\psi}/s) (\Psi_{ref} - |\Psi|) \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_{p_ψ}, K_{i_ψ} 分别为磁链调节器的比例参数和积分参数; s 为积分算子; I_{r_ref} 为转子励磁电流设定值; K_ψ 为过渡系数, 此阶段设为 1。

3) 此过程 K_1 闭合, 转差补偿模块根据电机参数、定子电流励磁分量设定值 I_{d_ref} 和定子电流转矩分量设定值 I_{q_ref} 计算转差 ω_{slip} , 如下式所示:

$$\omega_{slip} = K_\psi \times k_{Tr} \times \frac{I_{q_ref}}{I_{d_ref}} \quad (4)$$

式中: k_{Tr} 为根据图 3 同步电机异步启动近似等效电路模型设置的转差参数, 可由 R'_{Dd}/L'_{Dd} 计算近似得出。

反馈电机转速 ω_r 由下式得到:

$$\omega_r = \omega_\psi - \omega_{slip} \quad (5)$$

设定转速 ω_{ref} 和反馈电机转速 ω_r 经过速度调节器产生 I_{q_ref} , 如下式所示:

$$I_{q_ref} = (K_{p_{\omega_r}} + K_{i_{\omega_r}}/s) (\omega_{ref} - \omega_r) \quad (6)$$

式中: $K_{p_{\omega_r}}, K_{i_{\omega_r}}$ 分别为速度调节器的比例参数和积分参数。

4) I_{q_ref} 与 I_{q_fdb} 经转矩电流调节器得到转矩参考电压 U_q, I_{d_ref} 与 I_{d_fdb} 经励磁电流调节器得到励磁参考电压 U_d 。 U_q 和 U_d 经矢量反变换得到 U_a, U_b, U_c , 送入三相变频器经 PWM 调制输出同步电机定子绕组。

在速度和磁链闭环作用下产生足够的启动转矩使同步电机逐渐加速到无刷直流励磁装置工作所需的最小转速(该转速由无刷直流励磁装置工作特性决定)。

2.2.2 整步运行矢量控制阶段

当达到最小转速后, 变频器通知静态励磁装置输出强励电流, 旋转整流器开始工作, 向同步电机转子绕组投入励磁电流, 同时切除灭磁电阻。此时同步电机磁场由转子励磁装置和定子电流共同提供, 完成异步到同步的整步过程。最

终同步电机磁场由转子励磁装置独自提供, 平滑过渡到正常同步闭环控制过程。

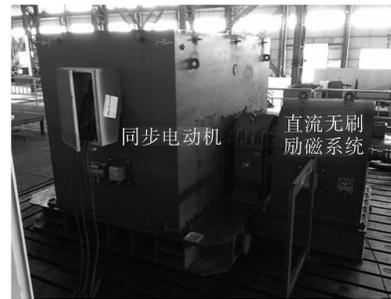
1) 此过程 K_2 闭合, 如式(3)所示, Ψ_{ref} 与 $|\Psi|$ 进入磁链调节器中控制, K_ψ 按斜率逐渐由 1 变为 0, 励磁调节器将调节控制量逐渐由 I_{d_ref} 转移分配给 I_{r_ref} , 并最终达到励磁全部由转子励磁装置给定。

电机由异步到同步到整步过程中, 要保证电机转速和转矩的稳定, 关键在于电机磁链的稳定控制。磁链调节器可以保证整个过程中电机磁链的稳定, 过渡系数 K_ψ 按斜率由 1 变为 0 则保证了电力励磁由定子励磁转移到转子绕组励磁, 实现了整步过程的平滑过渡。

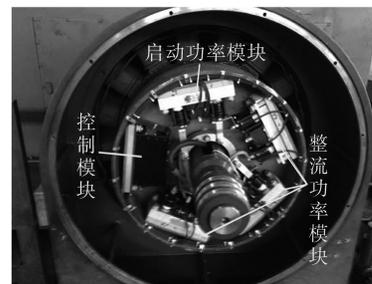
2) 随着整步过程的完成, 转差补偿也按 K_ψ 斜率逐渐减为零, 并最终断开 K_1 , 此时变频器进入正常的同步电机闭环矢量控制模式, 启动结束。

3 实验验证

为了验证本文所提出的无刷直流励磁同步电机启动控制策略的有效性, 在某电机试验站进行了相关试验研究。采用一台 10 kV, 2 000 kV·A 的级联高压变频器驱动无刷直流励磁同步电机, 被试电机参数为: 额定功率 1 600 kW; 额定电压 10 kV; 额定电流 107 A; 额定频率 50 Hz。电机实物图如图 5 所示。



(a) 电机实物图



(b) 转子励磁装置图

图 5 无刷直流励磁同步电机实物图

Fig.5 Practicality picture of brushless synchronous motor with DC excitation

为验证无刷直流励磁同步电机带载启动性能,使用陪试系统施加30%额定负载转矩。无刷直流励磁同步电动机启动过程波形图如图6所示。

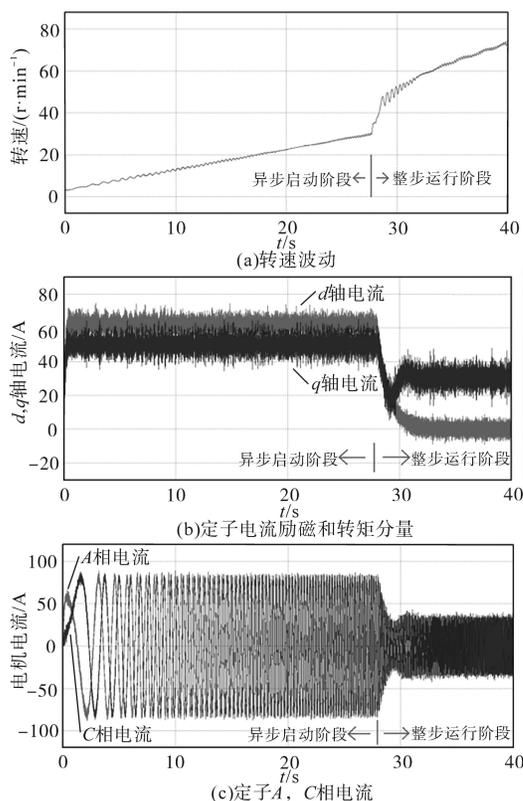


图6 无刷直流励磁同步电机启动过程波形图

Fig.6 Waveforms of brushless synchronous motor with DC excitation when starting

由图6可以看出,整个启动过程主要分为两个阶段。0~27s为异步启动阶段,此阶段转子励磁电流尚无法提供,由定子电流 d 轴分量提供转子磁场,通过异步启动矢量控制策略实现同步电机快速稳定地加速到30 r/min,电流和转矩平稳;从27s开始,静止励磁转置输出较大的励磁电流,同步电动机的转子励磁,定子电流 d 轴分量逐渐下降到零,进入投励整步过程。此过程电机定子电流和转速存在一定波动,但在闭环控制下会很快趋于稳定,完成启动过程,电机进入同步运行阶段。

通过实验结果可以看出,本文所提出的无刷直流励磁同步电机启动控制策略能够实现电机从异步启动到同步运行的平滑切换,有效消除电流冲击,具备优良的带载启动能力,实现较好的启动控制性能。

4 结论

本文对无刷直流励磁同步电机的启动过程建立等效模型,在此基础上提出了无刷直流励磁同步电机的启动控制策略。通过建立无刷直流励磁同步电机不同速度段矢量控制模型(异步启动矢量控制模型和整步运行矢量控制模型),实现不同闭环矢量控制策略的平滑切换,完成整个启动及运行阶段的高性能闭环矢量控制。通过实验验证表明,该控制策略能在无刷直流励磁同步电机启动过程提供优异的调速性能和高启动转矩,平滑实现从异步启动到同步运行的切换,扩展变频调速范围,在无刷直流励磁同步电机的变频调速领域具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 刘哲,刘小龙,褚志国. 高压变频器在增安型无刷励磁同步电动机上的应用[J]. 变频器世界,2009(3):54-57.
- [2] 彭丽巧,洪春. 无刷励磁同步电机变频驱动控制系统[J]. 变频器世界,2014(12):65-69.
- [3] 张丽萍,刘涛,陈继祥. 基于无刷同步电动机的启动控制方法研究[J]. 仪表技术,2016(5):9-14.
- [4] 魏佳丹,史明明,吴天国,等. 无刷交流同步电机无位置传感器启动控制[J]. 电机与控制学报,2014,18(9):60-67.
- [5] 李凤婷. 电励磁同步风力发电机无刷励磁控制策略的研究[D]. 西安:陕西科技大学,2012.
- [6] 汤蕴璆. 交流电机动态分析[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [7] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [8] 王晓远,李志广,车延博. 同步电动机异步全压启动研究[J]. 微电机,1999,32(6):7-11.

收稿日期:2018-09-16
修改稿日期:2019-10-11