

交流微电网负荷控制策略研究

随着新能源的不断发展,风力发电和光伏发电以及负荷可以组成微电网。交流微电网的负荷控制包括平衡负荷控制、不平衡负荷控制和非线性负荷控制。针对交流微电网的三种不同的负荷类型,提出了对应的控制策略,并对所提的控制策略进行了理论推导和相应的仿真验证。

谢毓广 罗亚桥 郑国强 王小明 郭力/国网安徽省电力公司电力科学研究院

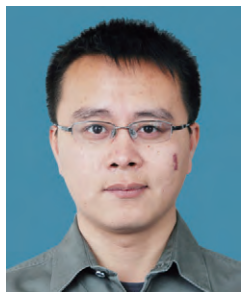
0 引言

随着经济的不断增长,对能源的需求也在不断地增长,虽然大多数电厂使用化石燃料,但分布式能源资源在低碳时代变得越来越流行。在过去的十年中,除了传统的电力网络,微电网的概念、生态能源的实施以及可靠性要求在过去十年中备受关注。分布式电源能够节省输变电投资和运行费用,减少集中输电的线路损耗;与大电网供电互为补充,减少电网容量,改善电网峰谷性能,提高供电可靠性,可以减少对环境的污染,因此备受关注。分布式电源包括:微型燃气轮机、风力发电、光伏发电、小水电、生物能发电、海洋能发电以及地热发电等。通过把一组分布式电源、储能和负荷等整合为一种低压系统的微电网运行,可以同时满足用户对电能质量和供电安全方面的要求。微电网又分为交流微电网和直流微电网以及两者都兼有的混合微电网,微电网能够实现多种能源综合互补利用,保证重要负荷的持续供电,解决偏远地区的供电问题,提高供电的可靠性和电能质量^[1-4]。

目前微电网的控制方法主要有主从控制、对等控制和分层控制三类^[5]。当

采用主从控制时,一般选取微电网中的容量较大的分布式电源接口变换器的控制器作为主控制器,通常采用下垂控制或 V/f 控制。其他分布式电源接口变换器的控制器为从控制器,从控制器采用恒功率(PQ)控制,分布式电源之间需要通信。采用对等控制时,微电网中的分布式电源不分主次,地位同等,各分布式电源均采用下垂控制或改进的下垂控制,就近根据接入位置电压、电流和频率等变量进行控制,不需要互相通信,能够自动调节输出功率分配,易于实现“即插即用”。采用分层控制时,通常系统设有一个中央控制器,各分布式电源控制器构成底层控制器,由中央控制器协调管理底层分布式电源控制器,中央控制器和底层控制器之间需要互相通信。

为了维持微电网的电能质量和供电平衡需要对微电网的负荷进行控制。文献[6]对维持微电网功率稳定的恒功率控制(PQ 控制)、下垂控制(Droop控制)以及恒压恒频控制(V/f 控制)三种控制策略进行了详细的介绍。文献[7]利用负荷预测算法,实现了微电网中不同运行模式对负荷的投切控制,保证敏感性负荷的不间断供电,对微电网负荷进行合理切除和恢复供电,更好地实现负荷的控制目标。针对高渗透率的微电网,大量民用单相负荷的供电会导致微电网不平衡问题,文献[8]对跟踪法、补偿法和滑模控制进行了分析比较,指出从控制效果来看,补偿法具有较好的控制效果,但从控制方法上看,滑模控制方法更加简单实用。文献[9]提出了一种



谢毓广/工程师

关键词/Keywords

交流微电网·
光伏发电·
负荷控制·
改进的重复控制·

基于频率控制的两级控制负荷的脱落方案。文献[10]对传统的下垂控制进行了改进,在孤岛模式下利用微电网电压水平来对有源负载进行控制,可以提高可再生能源的利用率。文献[11]提出利用三相四桥臂型变流器拓扑结构,来改善孤岛工况下带不平衡负载时的供电质量。并对传统的分序控制进行了改善,提出采用基于广义二阶积分器的正负序分离方法提出负载电压的正负序分量,再将其变换至对应的旋转坐标系进行控制。在独立的零轴控制中,引入比例谐振调节器,增强零序电压的控制性能,简化控制算法。文献[12]提出在原有PQ控制结构的基础上叠加前馈负序电压控制环,以抵消电网电压负序分量,从而维持三相平衡,通过改进开关函数调制法降低3次谐波分量输出。文献[13]指出微电网中普遍存在非线性和不平衡负载,极大地恶化了微电网的电能质量,微电网电能质量直接关系到微电网的稳定与经济运行。由于微电网中分布式电源(DG)所带本地负载类型(线性负载、非线性负载、平衡负载和不平衡负载)不同,因此需要协调控制各DG根据负载类型不同采用不同的控制策略,以保证微电网母线以及微电网公共耦合点上电能质量。文献[14]针对传统V/f下垂特性控制方法的不足,基于V/δ下

垂特性控制的思想,增加了 $P-\delta$ 下垂控制修正项和 $Q-V$ 下垂控制修正项。有效跟踪功率变化的动态特性,优化了微电网内部的负荷分配。

本文针对交流微电网的三种不同的负荷类型包括平衡负荷控制、不平衡负荷控制和非线性负荷控制提出了对应的控制策略,并对所提的控制策略进行了理论推导和相应的仿真验证。

1 交流微电网的结构

交流微电网是微电网的主要形式,不同类型的交流微电网基本结构相似,大多数采用辐射状结构,分布式电源、储能系统以及负荷等直接或经换流装置接入系统。交流微电网的基本结构如图1所示,包括储能逆变器之外的多个分布式电源,整个分布式电源和负荷构成了一个整体,通过一个断路器与配电网连接。当断路器断开,微电网运行于孤岛模式,由储能逆变器和其他分布式电源联合向负荷供电。图中分布式电源可为多种形式,例如风力发电、光伏发电和微型燃气轮机等。供电的负荷包括平衡类负荷、不平衡类负荷和非线性负荷。

图1中,光伏发电经过三相两电平变流器并入交流微电网,储能电池同样采用三相两电平变流

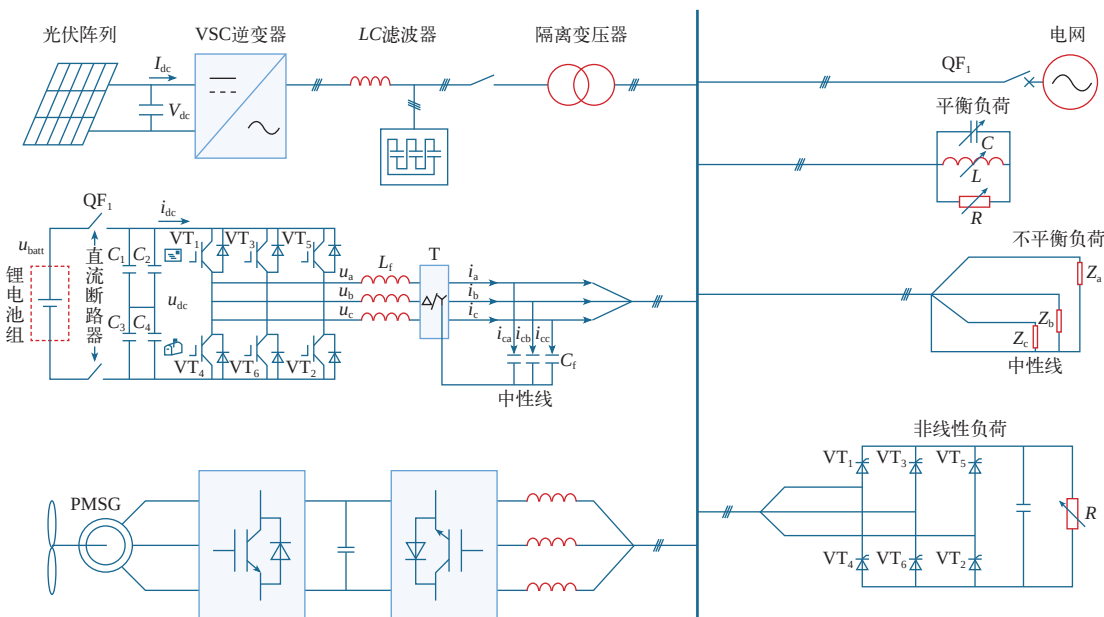


图1 交流微电网的结构

器结构。永磁同步发电机(PMSG)不需要齿轮箱进行变速,没有励磁绕组,具有更高的可靠性和发电效率。永磁同步发电机先经过整流器,然后利用三相两电平变流器并入到微电网。

根据文献[15]可以得到图1中三相两电平变流器在 $d-q$ 坐标系下的数学模型如式(1)和(2)所示,即

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = d_d U_C - e_d - \omega L i_q \\ L \frac{di_q}{dt} = d_q U_C - e_q + \omega L i_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} p = 1.5(e_d i_d + e_q i_q) = 1.5 e_d i_d \\ q = 1.5(e_q i_d - e_d i_q) = -1.5 e_d i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中, L 为并网等效电抗; i_d 为并网电流 d 轴分量; i_q 为并网电流 q 轴分量; p 为瞬时有功功率; q 为瞬时无功功率; e_d 为电网电压的 d 轴分量; e_q 为电网电压的 q 轴分量。

2 交流微电网负荷控制策略分析

针对微电网平衡负荷、不平衡负荷和非线性负荷,微电网变流器的控制策略主要包括:无差拍控制、滑模控制^[16]、重复控制、比例谐振控制^[17]和双旋转坐标系电压电流双环控制^[18]。无差拍控制动态性能好,波形畸变小,但对系统数学模型准确度要求高;滑模控制对参数变化和外部扰动不敏感,鲁棒性好,但滑模切换面很难选取,且只有系统采样频率高才能获得较好的控制效果;PR控制和双旋转坐标系电压电流双环控制

在不平衡负荷时能获得很好的控制性能,但对非线性负荷时无法实现无差调节;重复控制具有减少静差,易于应用的优点,但传统重复控制动态性能差,控制参数设计困难。本文分析了传统重复控制的原理,并对其进行了改进,使得系统动态性能得到改善,控制参数设计方便。

2.1 平衡类负荷控制策略

当负荷为无源类且不需要和交流电网同步时,无须设计锁相环,但要保证交流负荷供电电压幅值和频率恒定。本文采用基于交流电压 dq 分量的定交流电压控制策略 V/f 控制。负荷协调控制框图如图2所示。

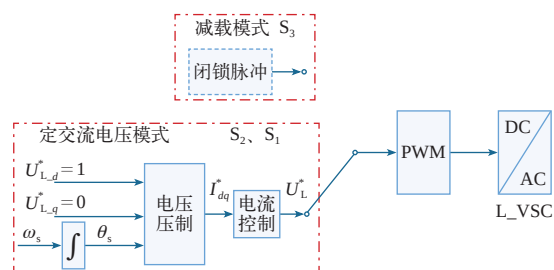


图2 负荷协调控制框图

由图2可以看出,当交流电压处在 S_1 、 S_2 正常模式时,负荷协调控制为定交流电压模式。当孤岛运行交流电压处在 S_3 模式,电源功率不足,储能电池不能继续放电,交流电压过低时,需要采取切负荷措施。先切除非敏感性负荷,然后按负荷优先级依次进行切除,保证敏感负荷的持续供电。

仿真验证基于交流电压 dq 分量的定交流电压控制结果如图3所示。

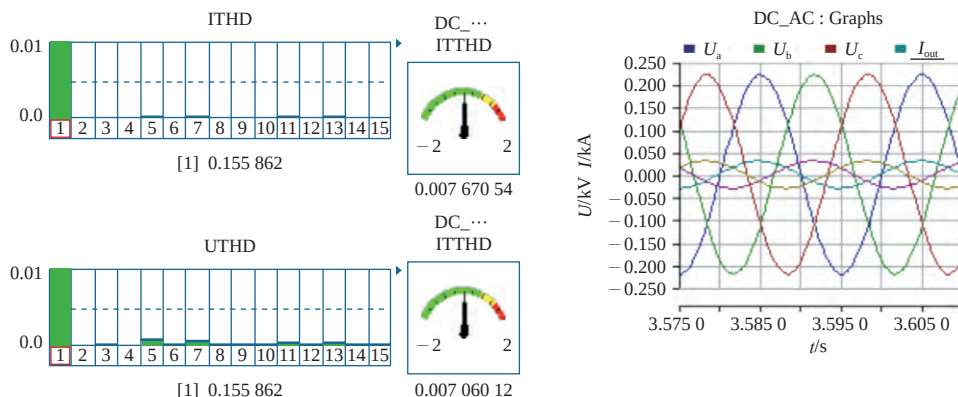


图3 负荷侧谐波含量和电压电流波形

从图3可以看出负荷侧的电压电流波形很好,电压的谐波含量 $\text{THD}_u = 0.7\%$,电流的谐波含量 $\text{THD}_i = 0.77\%$,都能很好地满足国家标准的要求。

2.2 不平衡类负荷的控制策略

针对不平衡负荷常用的矫正措施包括以下几种:三相分裂电容式逆变拓扑^[19]、三相四桥臂逆变拓扑^[20]、三个单相桥拓扑和 Δ/Y_0 变压器拓扑。三相分裂电容式逆变拓扑结构在单相负载时,电容需承受全负载相电流,所需电容容量较大,电压利用率低,且两个电容存在均压问题。三相四桥臂逆变拓扑在三相逆变桥基础上再增加一个桥臂来构成中点,形成对三相输出的公共点,使得可以输出三个独立的电压,这种结构正得到广泛的应用和研究。三个单相桥拓扑可以构成三套独立的控制电路,从而解决三相不平衡的问题,这种结构需要较多的开关,适合于大功率应用场合。 Δ/Y_0 变压器拓扑是最为简单和常用的矫正方法,当负荷不平衡时会造成输出电压不平衡,由于不平衡电压中的负序分量同样为周期性信号,因而重复控制能够消除输出电压中的负序分量;由于带 Δ/Y_0 连接变压器的逆变器中,零序分量并不能从逆变桥传输到输出端,因而输出电压中的零序分量不可控;由文献[21]分析可知,将输出滤波电感连接在变压器一次侧,可减小输出电压中的零序分量,输出电压中的零序分量为负荷零序电流在变压器高压侧漏感上的压降,含量较小。因而本文所采用的重复控制在负荷不平衡时仍具有较好的控制效果。双环控制电路图如图4所示。改进的重复控制框图如图5所示。

对于图5重复控制器而言,本文将电容电流内环与 $G(s)$ 等效为逆变器系统,则等效的系统传递函数为

$$G_e(s) = \frac{u_o}{u_i} = \frac{k_i}{L_f C_f s^2 + k_f C_f s + 1} \quad (3)$$

针对不平衡最严重的情况进行了仿真实验,即A相满载, B、C两相空载。仿真过程如下:在0~0.5 s内微电网变流器空载运行,在0.5 s时A相

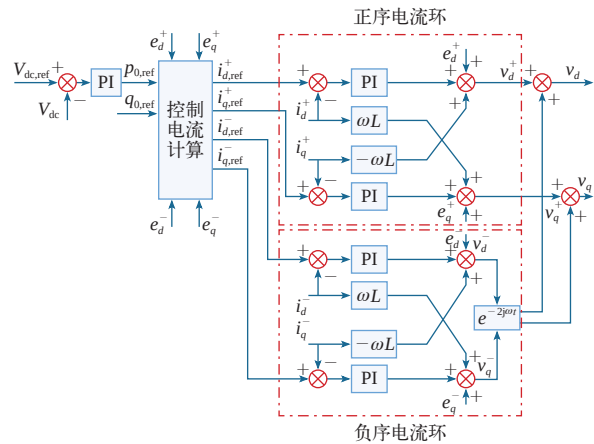


图4 双旋转坐标系电压电流双环控制

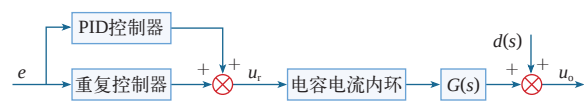
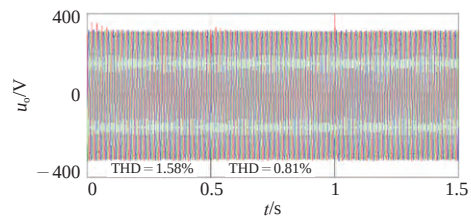
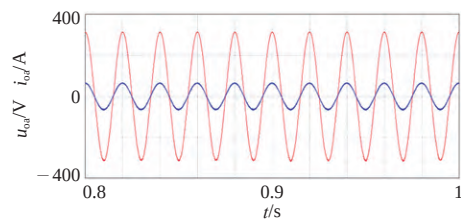


图5 改进的重复控制框图

投入10 kW阻性负荷,在1 s时切除负荷,系统空载运行,仿真结果如图6所示。



(a) 三相输出电压



(b) 输出电压输出电流波形

图6 带不平衡负荷时输出电压电流波形

由图6a可知,当微电网变流器空载运行时,三相输出电压平衡,A相输出电压的THD含量为1.58%;当投入A相负载满载运行,B、C两相空载运行时,微电网变流器输出电压暂态过程无冲击,系统响应速度快,稳定时A相输出电压的THD含量为0.81%;当负载切除时,微电网变流器输出电压有瞬时的电压冲击,但很快恢复稳定。

2.3 非线性类负荷的控制策略

在微电网中,非线性负荷的存在对微电网变流器的控制性能提出了更高的要求,本文针对三相桥式晶闸管全控整流电路进行了仿真实验,晶闸管的触发角为 $\alpha = 60^\circ$,整流电路直流侧滤波电容为 $4\ 700\ \mu\text{F}$,阻性负载大小为 $30\ \Omega$,仿真过程如下:在 $0 \sim 0.5\ \text{s}$ 时,微电网变流器控制运行,在 $0.5\ \text{s}$ 时投入整流负载,在 $1.5\ \text{s}$ 时切除整流负载,仿真波形如图7所示。

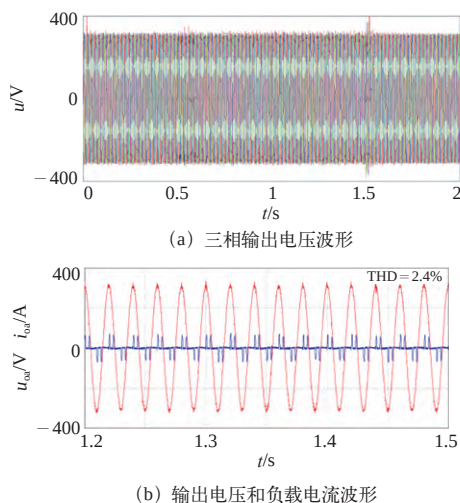


图7 带非线性负荷时输出电压电流波形

由图7a可知,在投入整流负载时,微电网变流器三相输出电压在经过两个基波周期后达到稳定,在切除整流负载时,微电网变流器输出电压经过一个基波周期后达到稳定,在投入和切除的暂态过程中,输出电压冲击小,能快速恢复。由图7b可知,在带整流负载达到稳态时,A相输出电压的THD为2.4%,谐波含量少。

3 模型验证

为了进一步验证理论分析的正确性,搭建了基于TI公司高性能信号处理器TMS320F28335的实验平台,DSP的工作频率为 $150\ \text{MHz}$,实验平台如图8所示。

为验证本文提出的控制策略的可行性,在实验室 $3\ \text{kW}$ 实验平台上进行了实验。非线性负荷为实验室另外一台可控直流源,可控直流源交流



图8 实验平台

侧接微电网变流器三相输出端,直流侧接阻性负载,得到的实验波形如图9所示。

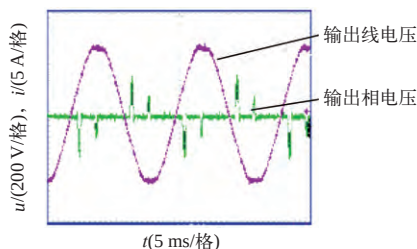


图9 带非线性负载时微电网变流器输出线电压和输出相电流波形

由图9可知,增加电容电流内环的重复控制在非线性负荷情况下,能确保输出电压具有很高的电能质量,实验结果证明理论分析和仿真实验的正确性。

4 结束语

本文通过建立交流微电网的模型,对交流微电网的基本控制进行了分析。仿真证明采用基于交流电压 dq 分量的定交流电压控制策略能够很好地维持平衡负荷的正常工作。对不平衡负荷和非线性负荷的控制,提出了采用比例积分微分控制和重复控制结合的控制策略,仿真和实验证实效果良好。

参考文献

- [1] 丁明,张颖媛,茆美琴.微电网研究中的关键技术[J].电网技术,2009(11):6-11.
- [2] Wu T F, Kuo C L, Sun K H, et al. DC-bus voltage regulation and power compensation with bi-directional inverter in DC-microgrid applications [C]. Phoenix, AZ: 2011.

- [3] Kakigano H, Nishino A, Ise T. Distribution voltage control for DC microgrid with fuzzy control and gain-scheduling control [C]. Jeju, 2011.
- [4] Dragicevic T, Guerrero J M, Vasquez J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (2) : 695-706.
- [5] 李彦林. 微电网电能质量主动控制策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [6] 杨文杰. 光伏发电并网与微电网运行控制仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [7] 冯敏. 风光柴储微电网系统的负荷预测算法及控制策略研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [8] 霍群海, 唐西胜, 孔力. 分布式电源本地不平衡负荷控制策略分析 [J]. 电力自动化设备, 2009 (8) : 63-66.
- [9] Raghani A, Ameli M T, Hamzeh M. Primary and secondary frequency control in an autonomous microgrid supported by a load-shedding strategy [C]. Tehran, 2013.
- [10] Vandoorn T L, Renders B, Degroote L, et al. Active load control in islanded microgrids based on the grid voltage [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2 (1) : 139-151.
- [11] 周啸, 金新民, 唐芬, 等. 三相四桥臂微电网变流器在离网不平衡负载下的控制策略及其实现 [J]. 电力系统保护与控制, 2013 (19) : 24-31.
- [12] 吕志鹏, 罗安, 荣飞, 等. 电网电压不平衡条件下微电网PQ控制策略研究 [J]. 电力电子技术, 2010 (6) : 71-74.
- [13] 王瑞琪. 分布式发电与微电网系统多目标优化设计与协调控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [14] 李福东, 吴敏. 微电网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011 (13) : 18-25.
- [15] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [16] Siew-Chong Tan. 电力电子变换器的滑模控制技术与实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [17] Haibing H, Qingbo H, Zhengyu L. A simple repetitive controller embedded in PI-based UPS for reducing Total Harmonic Distortion with nonlinear loads [C]. Jeju, 2006.
- [18] 李俊林. 单相逆变器重复控制和双环控制技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [19] Jeong C Y, Cho J G, Kang Y, et al. A 100 kVA power conditioner for three-phase four-wire emergency generators [C]. IEEE PESC' 98, Fukuoka, Japan, 1998.
- [20] Ryan M J, Rik W De Doncker, Lorenz R D. Decoupled control of a four-leg inverter via a new 4'4 transformation matrix [J]. IEEE Transactions on PE, 2001, 16 (5) : 694-700.
- [21] 彭力, 白丹, 康勇, 等. 三相逆变器不平衡抑制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (5) : 174-178.

(收稿日期: 2015-12-21) EA

(上接第58页)

组于2013年年底并网运行至今, 未发生不良反馈。

4 结束语

本文在介绍核电站发电机中性点接地方式和主要设备参数的基础上, 通过接地故障电流和机组的暂态过电压的计算分析, 将发电机中性点接地变压器二次侧接地电阻由1.6 Ω 变更为2.6 Ω , 从

而保证了核电机组安全稳定运行。

参考文献

- [1] 殷建刚, 彭丰, 王维俭. 合理配置发电机中性点接地方式 [J]. 电力设备, 2001 (4) : 67-70.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.

(收稿日期: 2015-04-12) EA