

基于网络分区的多适配性输配网协同潮流算法研究

高明¹, 赵月辉², 吴任博¹, 黄凯涛¹, 骆燕婷¹

(1. 广州供电局, 广东 广州 510620; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 针对传统算法不适用于输配电网一体化潮流计算这一情况, 提出输配协同潮流算法。该算法基于输配电网之间的电气连接关系及其各自网络结构特点, 对整个网络进行区域划分, 建立输配电网边界映射区, 处理其失配功率, 给出收敛判据。根据配电网部分不同地区的网络结构特征, 采用适合的算法对配电网进行分区计算。针对一体化潮流计算时电网中负荷功率被人工置数的情况, 给出相应处理方法。以广州输配电网为例进行了计算, 验证了协同潮流算法的准确性和多适配性。

关键词: 输配电网一体化; 协同潮流计算; 网络分区; 能量管理系统; 配电管理系统

Multi-suitability cooperative power flow for whole transmission and distribution networks based on network partitioning method

GAO Ming¹, ZHAO Yue-hui², WU Ren-bo¹, HUANG Kai-tao¹, LUO Yan-ting¹

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China; 2. Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In allusion to the situation that the traditional algorithms do not apply to power flow calculation of integrated transmission and distribution network, this paper constructs a cooperative power flow calculation algorithm. Based on the electrical connection relationship and structural characteristics of these two networks, the algorithm makes region division, builds boundary mapping area, processes mismatching power and discusses convergence judgements. According to the structure characteristics in different regions of distribution, appropriate algorithm is used for each division. A treatment method is given when the load power is manually set. The transmission and distribution network of Guangzhou is taken as a test case and the result shows the accuracy and multi-suitability of this algorithm.

Key words: integrated transmission and distribution; cooperative power flow calculation; region division; EMS; DMS

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0063-06

0 引言

潮流分析在众多电网分析应用中处于基础地位, 在能量管理系统(EMS)^[1-2]中, 它是静态安全分析、无功优化^[3]等应用的基础; 在配电管理系统(DMS)^[4]中, 它是解合环分析、负荷转供、网络重构^[5-6]等应用的基础。

目前EMS与DMS中的电网分析应用都是基于各自的潮流计算功能, 两个系统的潮流计算在对输配电网的边界部分进行了等值处理后, 分别对各自系统内的电网模型进行计算。然而, 在实际电网中输配电网之间是由电气设备相连的, 两者之间存在相互影响。因此, 对包含输配电网在内的整个电力系统进行一体化潮流计算, 可获得更准确的潮流分布, 同时为EMS和DMS中的其他电网分析应用提供良好的基础。

EMS中潮流计算通常采用PQ分解法^[7], 而DMS中潮流计算一般采用前推回代法及其改进算法^[8-12]。这是因为输配电网在网络结构、网络参数和网络规模上有很大的差异, 难以使用同一潮流计算方法对输配电网进行潮流计算。因此, 对输配电网应分别采用其适用的潮流算法。通常情况下, EMS和DMS中都已有的潮流计算功能, 对输配电网进行一体化潮流计算时应充分利用系统已有的潮流计算功能, 并避免对已有功能进行修改。

针对输配一体化的潮流计算, 文献[13]和文献[14]提出了基于主从分裂理论的全局潮流计算, 此算法通过交换边界设备功率来消除边界失配功率, 具有较好的网络适应性和收敛性, 但其未指出如何匹配输配电网的边界设备及其状态。文献[15]在文献[13]和文献[14]的基础上提出了网格计算环境下的输配一体化潮流计算算法, 此算法将配电网划分

为多个部分，通过对各馈线潮流进行并行计算，提高了计算速度，但需要并行计算环境，且编程较为复杂。

本文基于输电网与配电网的网络特点，将整个网络划分为输电区、配电区以及边界区。通过区域的划分，在潮流计算算法上对输电网和配电网进行解耦。针对配电网区域特征较明显的情况，对配电网进行分区潮流计算。提出协同潮流算法，建立边界映射区，对输电网采用 PQ 分解法、对配电网的不同分区域分别采用前推回代法和改进的前推回代法，迭代调用输配电网的潮流计算功能，通过边界映射区对边界设备功率进行交换并进行收敛性判断。以广州输配电网为例，使用协同潮流计算软件，可准确地计算输配电网的潮流分布。

1 边界映射区建立

EMS 和 DMS 的网络模型通常是分别独立建模，一般只建立本调度监控范围内的电网详细模型，其余部分采用等值处理。各调度系统中电网模型中会有重复建立的部分，称之为关口电网。关口电网的厂站在各调度中的模型是不一样的。对于输电网和配电网模型而言，其关口电网主要为 10 kV 电压等级设备。图 1 和图 2 分别为 EMS 和 DMS 中同一厂站的关口电网模型。

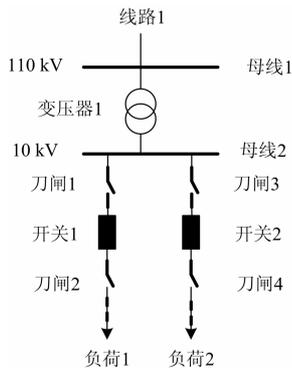


图 1 EMS 关口电网模型

Fig. 1 EMS gateway of grid model

EMS 关口电网模型中，110 kV 高压侧电网建模与实际电网一致，10 kV 低压侧电网将厂站外的馈线部分等值为负荷；DMS 关口电网模型中，110 kV 高压侧电网部分使用等值电源代替，10 kV 部分与实际电网一致。对比图 1 与图 2 可知，两者重复的部分为“母线 2”、“开关 1”、“开关 2”、“刀闸 1”、“刀闸 2”、“刀闸 3”、“刀闸 4”。对于 DMS 的“馈线 1”而言，其“馈线段 1”及其以下部分被等值为 EMS 中的“负荷 1”，其他馈线等值方法同前所述。

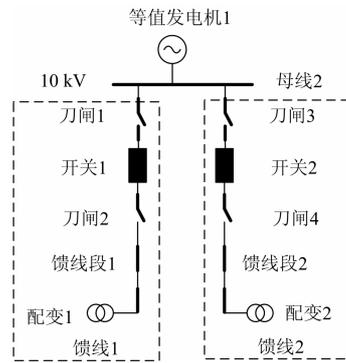


图 2 DMS 关口电网模型

Fig. 2 DMS gateway of grid model

因此，应针对关口电网部分建立五类边界设备映射关系：

(1) 厂站映射。建立“厂站映射表”，使 EMS 和 DMS 中关口电网模型包含的厂站能够匹配。

(2) 母线映射。建立“母线映射表”，使 EMS 和 DMS 中关口电网模型包含的 10 kV 母线能够匹配。

(3) 开关刀闸映射。建立“开关刀闸映射表”，使 EMS 和 DMS 中关口电网模型包含的开关、刀闸能够匹配。

(4) 负荷——馈线映射。建立“负荷——馈线映射表”，使 EMS 中的 10 kV 等值负荷与 DMS 中的对应馈线能够匹配。负荷与馈线的匹配可由“开关刀闸映射表”及其中设备的拓扑关系确定。

(5) 等值电源映射。建立“等值电源映射表”，使 DMS 中的等值电源与 EMS 中的被等值设备能够匹配。

建立边界设备映射关系后，整个输配电网被划分为输电网区、配电网区和边界映射区。其中输电网区与 EMS 中的网络模型一致，配电网区与 DMS 中的网络模型一致，二者通过边界映射区建立联系。

2 边界设备状态映射

潮流计算功能是建立在拓扑分析功能基础之上的，拓扑分析功能形成了电气设备之间的连接关系并可由此得到电气设备的带电状态。EMS 和 DMS 中的拓扑分析功能只对其各自的网络模型进行分析，由于网络模型对边界设备进行了等值，造成了输配电网模型在电气连接关系的割裂，导致输配电网关口电网模型中的边界设备状态的不一致，不能真实反映实际电网运行状态。因此需要进行边界设备状态映射。需要映射的设备状态如下：

(1) 排除状态映射。潮流计算中有时会排除某些设备, 使之不参与计算。因此应通过状态映射使边界映射区中的设备排除状态保持一致。

(2) 开合状态映射。开关、刀闸的开合状态对拓扑分析结果有很大影响。因此应通过状态映射使边界映射区中的开关、刀闸的开合状态保持一致。

(3) 带电状态映射。当输电网的某些设备的带电状态发生变化后, 配电网中设备的带电状态也会随之变化。因此应根据边界映射区中输电网设备的带电状态设置配电网设备的带电状态。

建立边界设备状态映射后, 当 EMS 和 DMS 中的设备状态发生变化后, 边界映射区中的边界设备状态是一致的, 与真实电网运行状态相符。

3 协同潮流计算

3.1 配电网区域划分

由于配电网设备较多, 且不同馈线间的电气耦合较弱, 因此可根据其运行时的网络结构以及是否包含分布式电源进行分区潮流计算, 并针对不同分区采用其适合的算法。对于不含分布式电源的馈线, 当其为辐射状时, 此馈线为一个分区, 采用前推回代法; 当其为弱环状时, 此馈线及其相连接线为一个分区, 采用改进的前推回代法。对于含分布式电源的馈线, 当分布式电源点可当作 PQ 节点且馈线为辐射状时, 此馈线为一个分区, 采用前推回代法; 当分布式电源点不可当作 PQ 节点或馈线为弱环状时, 此馈线及其相连接线为一个分区, 采用改进的前推回代法。

通过对配电网进行区域划分, 使得配电网不同区域的潮流计算可使用相应的最佳算法, 提高潮流计算的效率、准确度和收敛性, 避免了单一算法难以适应配电网复杂运行方式的缺陷。同时, 配电网区域划分在配电网内部进行, 不影响输配电网间的区域划分。

3.2 分布式电源的处理

分布式电源并入配电网后, 会改变配电网的潮流分布。根据分布式电源并网方式的不同, 在进行配电网部分的潮流计算时, 应将其作为不同的节点类型处理^[16-17]。对于采用异步发电机组并网的分布式发电系统, 由于异步发电机需要从电网吸收无功, 在进行潮流计算时, 认为其发出的有功功率是给定的, 其无功功率受机端电压影响。因此可在每次迭代前, 根据节点电压计算出无功功率后, 将其当作 PQ 节点处理。

对于采用同步发电机组并网的分布式发电系统, 当其励磁系统采用电压控制时, 将其当作 PV

节点处理; 当其励磁系统采用功率因数控制时, 将其当作 PQ 节点处理。

对于采用电力电子装置并网的分布式发电系统, 如燃料电池、光伏电池等, 当其并网点未发生无功越限时, 将其当作 PV 节点处理, 当其发生并网点无功越限时, 把无功注入值设为无功输出限值后, 将其当作 PQ 节点处理。

3.3 协同潮流算法

设边界映射区“负荷—馈线映射表”中的负荷及其对应馈线数量为 m , 且 EMS 中第 i 个负荷的有功功率、无功功率分别为 P_{Ei} 和 Q_{Ei} , 其对应的 DMS 中的馈线总消耗有功功率、无功功率分别为 P_{Di} 和 Q_{Di} ; 边界映射区“母线映射表”中母线数量为 n , 且 EMS 的第 j 条母线电压为 V_{Ej} , 其对应的 DMS 的母线电压为 V_{Dj} 。因此, 在实际电网中, 应满足以下条件:

$$\begin{cases} P_{Ei} = P_{Di} & (i=1,2,\dots,m) \\ Q_{Ei} = Q_{Di} & (i=1,2,\dots,m) \\ V_{Ej} = V_{Dj} & (j=1,2,\dots,n) \end{cases} \quad (1)$$

在输电网潮流计算中, V_E 是随 P_{Ei} 和 Q_{Ei} 变化的, 由 3.2 节可知, P_{Di} 和 Q_{Di} 是随 V_D 变化的, 因此 EMS 和 DMS 各自进行潮流计算时, 式 (1) 一般不成立, 需要通过迭代计算使之得到满足。迭代收敛条件如下:

$$\begin{cases} \max\{|P_{Ei} - P_{Di}| < \varepsilon_p\} & (i=1,2,\dots,m) \\ \max\{|Q_{Ei} - Q_{Di}| < \varepsilon_q\} & (i=1,2,\dots,m) \\ \max\{|V_{Ej} - V_{Dj}| < \varepsilon_v\} & (j=1,2,\dots,n) \end{cases} \quad (2)$$

式中, ε_p 、 ε_q 、 ε_v 分别为有功功率、无功功率、电压的收敛精度。

计算过程为

(1) 采用 PQ 分解法计算输电网潮流分布。计算收敛则转步骤 (2), 否则计算结束。

(2) 对于边界映射区“母线映射表”, 将配电网母线电压 V_{Dj} 修正为 V_{Ej} 。

(3) 计算配电网潮流分布。计算收敛则转步骤 (4), 否则计算结束。

(4) 根据式 (2) 判断迭代是否收敛, 若收敛或达到迭代次数上限则结束计算, 否则转步骤 (5)。

(5) 对于边界映射区“负荷—馈线映射表”, 将输电网有功功率 P_{Ei} 修改为 P_{Di} , 无功功率 Q_{Ei} 修正为 Q_{Di} , 转步骤 (1)。

3.4 人工置数的处理

为模拟不同运行情况下电网的潮流分布, 在进行潮流计算之前, 通常会修改现有的电网断面, 即

对部分负荷的有功功率、无功功率进行人工置数。在进行协同潮流计算时,当边界映射区的输电网等值负荷功率被人工置数后,其数值在迭代过程中不应发生变化,因此 3.3 节中协同潮流计算过程的步骤(5)不再适用。应将被人工置数的边界映射区负荷功率分配到“负荷—馈线映射表”中对应的馈线中去。以负荷有功功率被人工置数为例,其计算流程如下:

设边界映射区“负荷—馈线映射表”中的等值负荷 i 被人工置数后有功功率为 P_{Ei} , 其对应的 DMS 中的馈线共有 n 个负荷, 其中前 m 个负荷的有功功率被人工置数, 其他负荷的有功功率未被人工置数, 各负荷分配前的有功功率为 P_{Di} 。若对馈线负荷的有功功率进行分配时采用平均分配策略, 分配后负荷的有功功率 P'_{Di} 计算公式为

$$\begin{cases} P'_{Di} = P_{Di} & (i=1, \dots, m) \\ P'_{Di} = P_{Di} + \frac{(P_{Ei} - \sum_{k=1}^m P_{Dk})}{(n-m)} & (i=m+1, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

4 算例分析

本文以广州输电网和某个区的配电网为研究对象, 输电网包含的电压等级为 10 kV 及其以上部分, 配电网包含的电压等级为 10 kV 及其以下部分。输电网模型分别采用现有的 EMS 和 DMS 中的电网模型, 模型相互独立。使用 C++ 语言编制协同潮流计算程序, 运行环境为 Linux 操作系统。

协同潮流计算程序调用的输电网潮流计算功能采用 PQ 分解法, 功率收敛精度为 0.000 1 pu (功率基准值为 100 mVA); 配电网潮流计算功能采用前推回代法及其改进算法, 电压收敛精度为 0.000 1 pu; 边界映射区的功率收敛精度为 0.000 1 pu (功率基准值为 100 kVA), 电压收敛精度为 0.000 1 pu。

算例中, 边界映射区设备数量与输电网的设备数量统计见表 1, 其中输电网模型中的同一设备只计一次。

表 1 电网模型设备统计

Table 1 Number statistics of devices in grid

	边界映射区	输电网中	二者比例
厂站	37	413	8.96%
母线	122	9 350	1.30%
负荷与馈线	731	10 698	6.83%
开关与刀闸	3 214	53 023	6.06%
等值电源	82	1 243	6.60%

由表 1 可知, 边界映射区包含的设备数量占输电网总设备数量比例极小, 且只需建立一次, 在迭代过程中无需修改, 因此其所需内存空间与消耗时间也很小。迭代过程中需要交换的潮流数据主要为边界映射区的母线电压以及负荷、馈线的功率, 由表 1 可以看出, 需要交换的潮流数据占总潮流计算数据的比例也很小。

算例中的每轮协同潮流计算过程中的输电网潮流计算迭代次数统计见表 2, 其中配电网单馈线平均迭代次数为配电网各馈线迭代次数之和除以配电网总馈线个数。

表 2 迭代次数统计

Table 2 Iterations statistics

协同迭代轮数	输电网迭代次数	配电网单馈线平均迭代次数
1	10	2.8
2	9	2.7
3	9	2.7

由表 2 可知, 每轮协同潮流计算中, 输电网的潮流迭代次数变化不大。由此可见, 协同潮流计算对输电网各自的潮流计算稳定性影响很小。一般经过 3~4 次的输配协同迭代, 协同潮流计算可以收敛。

算例中, 协同潮流计算前后的边界设备电压、功率失配量见表 3。

表 3 边界设备潮流对比

Table 3 Comparison of boundary area devices power

	最大电压失配量/kV	最大有功功率失配量/kW	最大无功功率失配量/kvar
协同潮流计算前	0.46	131	61
协同潮流计算后	<0.000 1	<0.1	<0.1

由表 3 可知, 经过协同潮流计算, 大大减小了边界设备的电压和功率失配量, 提高了潮流计算的准确性。

5 结论

本文对输电网的结构特点及其各自适用的潮流算法进行分析, 在此基础上提出将输电网进行区域划分, 使之在潮流计算应用层解耦。通过建立边界映射区, 在 EMS 和 DMS 电网模型之间建立了电气连接关系。通过边界设备状态映射, 使 EMS 和 DMS 中的设备状态同实际电网保持一致。提出

协同潮流算法, 消除了边界设备潮流不平衡, 提高了输电网潮流计算的准确性, 实现了输电网一体化潮流计算。

针对诸如广州电网的特大型城市电网配电网部分网架结构复杂, 部分地区为辐射状电网, 部分地区为弱环状电网, 部分地区包含分布式电源这些特性, 提出了配电网分区计算, 对于不同分区, 根据其特性采用相应算法, 使得配电网部分的潮流计算更具普适性。

协同潮流算法可利用 EMS 和 DMS 现有的潮流计算功能, 而无需进行修改, 因此其可适用于多种 EMS 和 DMS 系统; 同时, 协同潮流计算过程中需要交换的边界数据量较少, 即可应用于集中式计算环境, 也可通过通信方式, 使之应用于分布式计算环境, 具有很强的适用性。这种先对全网进行输配分区, 再对配电网内部进行分区的计算架构, 使其在进行输配电网潮流计算时, 可采用多种适用算法, 具有较好的工程实用性和电网适配性。广州输配电网的算例说明, 协同潮流算法适用于大规模输配电网一体化潮流计算, 能够提高潮流计算的准确性。

参考文献

- [1] AZEVEDO G P, FEIJO B, COSTA M. Control centers evolve with agent technology[J]. *Computer Applications in Power IEEE*, 2000, 13(3): 48-53.
- [2] KEZUNOVIC M, BOSE A. The future EMS design requirements[C] // *System Sciences (HICSS)*, 2013: 2354-2363.
- [3] 宫一玉, 吴浩, 杨克难. 一种基于潮流追踪的电力系统无功控制分区方法[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(9): 29-33.
GONG Yi-yu, WU Hao, YANG Ke-nan. A network partition method for power system reactive power control based on power flow tracing[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(9): 29-33.
- [4] 陈竟成, 张学松, 于尔铿. 配电管理系统(DMS)及其应用功能[J]. *电力系统自动化*, 1999, 23(18): 45-48.
CHEN Jing-cheng, ZHANG Xue-song, YU Er-keng. Distribution management system and its application functions[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(18): 45-48.
- [5] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 以降损和载荷均衡为目标的地区电网网络重构快速算法[J]. *电网技术*, 2012, 26(11): 172-178.
JI Guo-qiang, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming, et al. Regional network reconfiguration algorithm for loss reduction and loading equilibrium[J]. *Power System Technology*, 2012, 26(11): 172-178.
- [6] 王少林, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑分布式电源出力调整的多目标配电网重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(18): 117-122.
WANG Shao-lin, TANG Wei, BAI Mu-ke, et al. Multi-objective optimization of distribution network reconfiguration considering adjusting the output of distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(18): 117-122.
- [7] STOTT B, ALSAC O. Fast decoupled load flow[J]. *IEEE Trans on PAS*, 1974, 93(3): 859-869.
- [8] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(8): 123-130.
ZHANG Li-mei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(8): 123-130.
- [9] 吕学勤, 吴辰宁. 含分布式电源的配电网潮流计算改进方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(21): 48-51.
LÜ Xue-qin, WU Chen-ning. Modified power flow calculation method of distribution grid with DGs[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(21): 48-51.
- [10] 张学松, 柳焯, 于尔铿, 等. 配电网追赶法潮流[J]. *中国电机工程学报*, 1997, 17(6): 382-385.
ZHANG Xue-song, LIU Zhuo, YU Er-keng, et al. A load flow technique for distribution system based on triangular step by step method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1997, 17(6): 382-385.
- [11] SHIMOHAMMADI D, HONG H W, SEMLYEN A, et al. A compensation based power flow for weakly meshed distribution and transmission networks[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1988, 5(2): 753-762.
- [12] 代江, 王韶, 祝金锋. 含分布式电源的弱环配电网潮流计算[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(10): 37-41, 46.
DAI Jiang, WANG Shao, ZHU Jin-feng. Power flow method for weakly meshed distribution network with

- distributed generation[J]. Power System Protection and Control 2011, 39(10): 37-41, 46.
- [13] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 发输配全局潮流计算——第一部分: 数学模型和基本算法[J]. 电网技术, 1998, 22(12): 39-42.
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. Global power flow calculation —— part 1: model and method[J]. Power System Technology, 1998, 22(12): 39-42.
- [14] 孙宏斌, 张伯明, 相年德, 等. 发输配全局潮流计算 ——第二部分: 收敛性、实用算法和算例[J]. 电网技术, 1999, 23(1): 50-53.
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de, et al. Global power flow calculation —— part 2: convergence, practical algorithm and numerical test[J]. Power System Technology, 1999, 23(1): 50-53.
- [15] 陈羽, 刘东, 廖怀庆, 等. 网格计算环境下输配电网联合潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 42-47.
CHEN Yu, LIU Dong, LIAO Huai-qing, et al. Transmission and distribution networks united power flow under grid computing environment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 42-47.
- [16] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.
CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40.
- [17] 彭彬, 刘宁, 吴迪. 配电网潮流计算中的分布式电源建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 152-156.
PENG Bin, LIU Ning, WU Di. Modeling of distributed generation for distribution system power flow calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(2): 152-156.
-
- 收稿日期: 2014-02-17; 修回日期: 2014-03-17
- 作者简介:
- 高明(1978-), 男, 硕士, 从事EMS与调度信息化运维与研究; 赵月辉(1987-), 男, 通信作者, 硕士, 从事调度自动化和配网自动化研究工作。E-mail: zyhyz1987@qq.com