

基于配电监测数据的 10 kV 配网实时三相线损计算

张 锋,江道灼,黄民翔

(浙江大学电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 结合配电自动化系统的实际应用情况以及配网的一些自有特点,利用现场监控单元上传的三相实时数据,提出一种以馈线段而不是整条馈线为基本计算单元的三相实时线损计算方法。该方法利用变结构耗散网络理论,将馈线划分为馈线段,并基于馈线段对段内各个设备进行数学建模,在结合系统实时运行数据的基础上,不仅可以获得比旧有方法精确许多的线损计算结果,而且能计算出所有馈线段内各个设备的详细线损情况,使系统内的线损分布一目了然,有利于运行人员轻松方便地进行配网线损分析与计算,为进一步优化配网系统提供了有力依据。

关键词: 配电自动化; 现场监控单元; 线损计算

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)03-0015-05

1 引言

配网线损计算是配网经济运行、无功优化、网络规划和电网技术改造等的基础^[1~2]。随着城乡配网改造工程的实施,配网的网架关联性大大增加,配网运行方式日趋复杂多样化^[3];同时配网具有环网结构开环运行、正常运行时一般呈辐射型树状,线路参数中 r/x 较大,多相不平衡接地或不接地运行、三相负荷不对称问题比较突出,配变一般采用 $/Y_0$ 接法等特点^[4],因此难以采用一些传统的线损计算方法^[5~6]如等值电阻法等准确计算其线损^[7]。

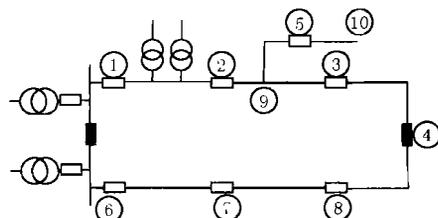
配网线损计算是电力系统的传统问题,目前存在很多的计算方法。针对一些对计算精度要求不高的应用场合,一般采用估算或估算结合潮流计算的方法^[5~6](如等效电流法、等值电阻法、回归分析法等);在对精度要求较高的场合下,多采用潮流计算方法^[8](如等效节点功率法、损耗功率累加法等)。估算方法的误差较大,而潮流法计算时间长、效率低,而且某些情况下尚需经过特殊处理。

目前,一个好的配电自动化系统,一般具有网络优化和重构的功能,这就需要准确的实时线损计算作为依据,而上述两类方法都不能很好地满足要求。随着配电自动化系统的逐步推广,大量馈线现场终端单元(FIU)和变压器终端单元(TTU)的装设克服了传统线损计算只能从线路出口获取数据的局限性,配网中一些开关以及配变低压侧电流的大小和相位可以直接获得,充分利用这些 FIU 和 TTU 以及馈线出口断路器上 RTU 的上传三相运行数据,对配网馈线进行合理的数学建模,为实现准确快速了解

配网各线路以及配变的线损分布状况提供了可能。

2 线损计算基本单元

目前,线损分析系统的最小计算单位一般是馈线^[9]。实际上,在馈线上安装了 FIU 后,相邻的 FIU 在物理上自然地把馈线分成了不同的馈线段,可以将这些位于分段 FIU 之间的馈线段作为线损计算的基本单元。基本计算单元小型化,不仅可以针对各个馈线段进行线损分析,从而达到在馈线段内确定线路薄弱环节的目的,而且可以利用多线程并行计算技术提高线损计算速度,从而满足实时线损计算的要求。如图 1 中的典型配网馈线系统所示,在节点 1、2、3、4、5、6、7 和 8 上均安装有 FIU,从而将图中的两馈线六分段系统划分为七个馈线段(1,2)、(2,3,5)、(5,10)、(3,4)、(6,7)、(7,8)和(8,4)。



□ 处于合状态的断路器、分段开关和联络开关
■ 处于分状态的断路器、分段开关和联络开关

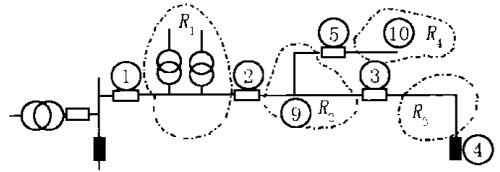
图 1 典型的配网馈线系统

Fig. 1 A typical distribution feeder system

3 馈线段的定义和分离

根据适用于配网的变结构耗散网络理论^[9],可以将 10 kV 馈线线路上的节点分为四类:

- (1) 源点: 馈线出口断路器对应节点 (如图 1 中的节点 1 和 6)
- (2) 耦合点: 馈线 T 接分支对应节点 (如图 1 中的节点 9)
- (3) 普通测控点: 馈线安装有 FTU 的开关对应的节点 (如图 1 中的节点 2、3、4、5、6、7 和 8)
- (4) 末节点: 馈线末梢点, 一直处于开断位置 (如图 1 中的节点 10)



□ 处于合状态的断路器、分段开关和联络开关
 ■ 处于分状态的断路器、分段开关和联络开关

图 3 图 1 中的一条典型馈线的馈线段划分
 Fig. 3 The partition of a typical feeder in Fig 1

这里所说的馈线段实质上是变结构耗散网络理论中定义的区域, 区域是指相互连通的若干弧构成的子图, 其边界点可为源点、普通测控点或未节点, 不能为耦合点。耦合点只能作为馈线段的内点。同时, 对于没有安装现场监控终端的某些节点而言, 其上运行参数不可知, 故也只能作为馈线段的内点, 同时在算法处理中等同于耦合点处理。馈线段的分离是以单条馈线进行的, 其详细流程框图如图 2 所示。图 3 给出了图 1 中的一条馈线根据图 2 流程划分出的 4 个馈线段: R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 。

4 馈线段内参数准备

根据馈线分离后得到的馈线段信息, 同时结合网络拓扑和设备参数数据库, 可以得到馈线段内所有馈线分支线路以及配变的相互关联情况以及详细参数信息, 再将安装有 RTU、FTU、TIU 等现场监控单元的监控点上传三相实时数据与对应设备绑定, 为进行馈线段内线损计算做准备。

5 馈线段三相线损计算方法

三相负荷不平衡时, 各相的负荷电流不相等, 就在相间产生了不平衡电流。这些不平衡电流除在相线上引起损耗外, 还将在中性线上引起损耗从而增加总的线损。取全部负荷由一相供电的极端情况, 其线损是三相平衡状态的 6 倍, 可见三相不平衡造成线损增大是相当显著的, 一个精确的线损计算系统必须要考虑系统的三相不平衡特性^[1]。其实现可以以馈线段内的 TIU、FTU 以及 RTU 上传的三相运行数据为基础, 利用对称分量法处理系统的三相不平衡, 通过基尔霍夫电流定律求出馈线段内每条线路的电流, 从而得到该馈线段内的能量损耗。最后, 通过总和一条馈线内的所有馈线段的能耗得到馈线的能耗。

5.1 计算前提

配电网中的变电所出口电压的不对称度一般不超过 0.5% ~ 1.5%, 因此可在线损计算过程中假设系统同一点三相电压对称且幅值相等^[4]。

5.2 馈线段内支线损耗的计算

5.2.1 由配变低压侧三相电流求取高压侧三相电流

图 4 是一个典型的馈线段, 其馈线段起点为节点 1, 馈线段末点为变压器对应的末节点, 馈线段内含有 T_1 、 T_2 、 T_3 三个配变以及 L_1 、 L_2 、 L_3 三条支线。

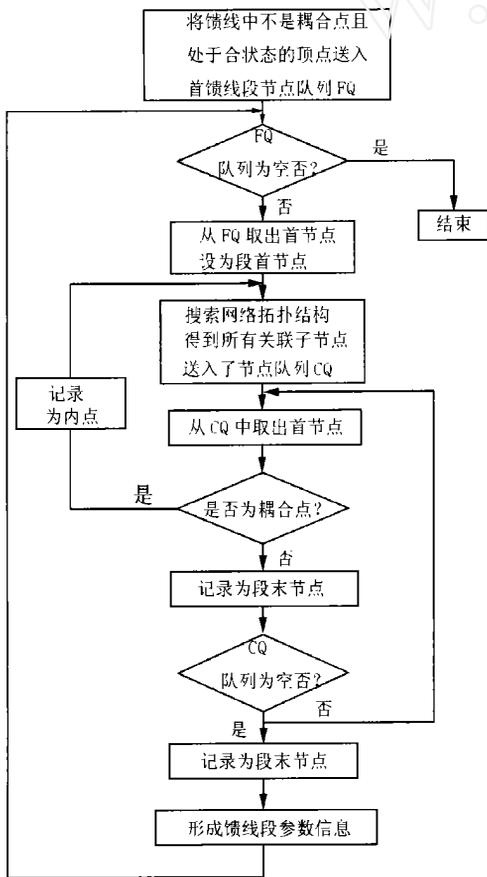


图 2 馈线段分离流程框图

Fig. 2 The program flow of feeder section separation

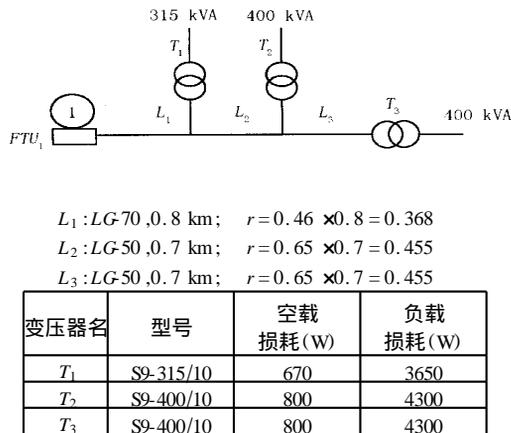


图4 一个典型的馈线段

Fig. 4 A typical feeder section

由配变 TTU 上传数据,可知配变低压侧电流 I_a, I_b, I_c 以及功角 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c , 故而配变低压侧三相不平衡电流为

$$I_a = I_a \quad \phi_a \quad (1)$$

$$I_b = I_b \quad \phi_b \quad (2)$$

$$I_c = I_c \quad \phi_c \quad (3)$$

配变一般采用 $/Y_0$ 接法,故零序电流在 10 kV 配网中不能流通。对三相分量进行对称分解,可以求得

$$I_{a1} = \frac{1}{3} [I_a \cos \phi_a + I_b \cos(\phi_b + 120^\circ) + I_c \cos(\phi_c + 240^\circ)] + \frac{1}{3} j [I_a \sin \phi_a + I_b \sin(\phi_b + 120^\circ) + I_c \sin(\phi_c + 240^\circ)] \quad (4)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} [I_a \cos \phi_a + I_b \cos(\phi_b + 240^\circ) + I_c \cos(\phi_c + 120^\circ)] + \frac{1}{3} j [I_a \sin \phi_a + I_b \sin(\phi_b + 240^\circ) + I_c \sin(\phi_c + 120^\circ)] \quad (5)$$

根据配变高低压侧接线形式以及配变变比,利用以上分量可求得高压侧线路电流。例如以配变常见接线形式 $/Y_0-11$ 为例,可以得到如下高压线路电流:

$$I_A = \frac{1}{k} (I_{a1} e^{j30^\circ} + I_{a2} e^{-j30^\circ}) \quad (6)$$

$$I_B = \frac{1}{k} (I_{a1} e^{-j120^\circ} e^{j30^\circ} + I_{a2} e^{j120^\circ} e^{-j30^\circ}) \quad (7)$$

$$I_C = \frac{1}{k} (I_{a1} e^{j120^\circ} e^{j30^\circ} + I_{a2} e^{-j120^\circ} e^{-j30^\circ}) \quad (8)$$

式(6)、(7)和(8)中的 k 为变压器的变比。

绝大多数的 10 kV 中压网络以主干馈线为基础,支路或分支馈线从主馈线上“T”接出来,基于基尔霍夫电流定律,可以计算得到其他线路电流。

5.2.2 支线损耗

根据 5.2.1 计算得到的每条支线上的三相电流,可以分相计算该支线的损耗,见式(9)。

$$\begin{cases} A_{L_A} = I_A^2 \times R_A \times t \times 10^{-3} \text{ (kWh)} \\ A_{L_B} = I_B^2 \times R_B \times t \times 10^{-3} \text{ (kWh)} \\ A_{L_C} = I_C^2 \times R_C \times t \times 10^{-3} \text{ (kWh)} \\ A_L = A_{L_A} + A_{L_B} + A_{L_C} \end{cases} \quad (9)$$

式中 R_A, R_B, R_C () 分别为相应支线 A、B、C 三相的电阻; t (h) 为计算时间 (TTU、FTU、RTU 数据采集的时间间隔)。

5.3 馈线段内配变损耗计算

变压器损耗分为铜耗和铁耗。铜耗是可变损耗(与设备通过的电流有关),铁耗是不变损耗(与设备上所加的电压有关)。

在考虑配网三相负荷不平衡的基础上,可按式(10)计算变压器的铜耗。

$$P_k = \frac{P_k}{3} \times \left[\left(\frac{I_a}{I_{2N}} \right)^2 + \left(\frac{I_b}{I_{2N}} \right)^2 + \left(\frac{I_c}{I_{2N}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中: P_k (kW) 为变压器短路损耗; I_{2N} (A) 为配变低压侧额定电流; I_a, I_b, I_c (A) 为配变低压侧实测电流。

而配变的铁耗即为配变的空载损耗 P_0 ,故变压器的总损耗为

$$A_T = (P_k + P_0) \times t \quad (11)$$

5.4 馈线段的损耗

馈线段的总损耗是馈线段内所有支线损耗和配变损耗的总和,如式(12)。

$$A_R = \sum_{i=1}^M A_{L_i} + \sum_{i=1}^N A_{T_i} \quad (12)$$

式中: M 为馈线段内支线数; N 为馈线段内配变数。

5.5 馈线的损耗

在得到馈线内所有馈线段损耗的基础上,可以利用式(13)求取整条馈线的损耗。

$$A = \sum_{i=1}^N A_{R_i} \quad (13)$$

式中: N 为馈线内馈线段数。

6 计算实例

以图 4 所示馈线段为例,其线路参数和变压器参数已经标注在图中。假设在节点 1 处安装有监测 10 kV 馈线运行数据的 FTU₁,在变压器 T₁、T₂、T₃ 处分别安装有监测变压器低压侧运行数据的 TTU₁、TTU₂、TTU₃。假设这些现场终端单元上传的系统运

行参数如表 1 所示,并假定各个变压器低压侧出口 0.4 kV 系统上相电压角度为 $\phi_a = 0^\circ, \phi_b = -120^\circ,$

$\phi_c = 120^\circ$ 。利用前面所述的方法对系统进行计算, 计算结果如表 2、3、4 所示,线损分析结果见表 5。

表 1 图 4 中安装的现场终端单元上传的变压器低压侧三相运行参数

Tab. 1 The three-phase parameters of transformer LV side transmitted by FTU in Fig. 4

单元名	I/A			ϕ_1			P/kW			Q/kVar		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
TTU ₁	411.4	336.9	342.9	- 38.6°	- 155.7°	84.2°	94.2	63.2	64.2	59.4	45.4	46.4
TTU ₂	578.5	482.4	498.0	- 36.8°	- 157°	83.1°	107	89	92	80	67	69
TTU ₃	494.5	458.1	433	- 37.2°	- 156.5°	83.1°	91	85	80	69	63	60

表 2 计算得到的变压器高压侧电流

Tab. 2 The calculated current of transformer HV side

变压器名	I/A			ϕ_1		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
T ₁	14.7	13.6	15.31	- 10.6°	- 125.5°	115.6°
T ₂	21.27	19.60	21.54	- 9.9°	- 126.4°	115.6°
T ₃	18.99	17.86	18.59	- 8.1°	- 127.6°	115.1°

表 3 计算得到的 10 kV 线路电流

Tab. 3 The calculated current of 10kV line

线路名	I/A			ϕ_1		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
L ₁	55.03	51.06	55.44	- 9.5°	- 126.6°	115.5°
L ₂	40.26	37.46	40.13	- 9.1°	- 127.0°	115.4°
L ₃	18.99	17.86	18.59	- 8.1°	- 127.6°	115.1°

表 4 馈线段内设备对应的损耗

Tab. 4 The corresponding losses of equipments in feeder section

单位:kW

设备名	L ₁			L ₂			L ₃			
	相名	A	B	C	A	B	C	A	B	C
有功损耗(kW)	1.114	0.959	1.131	0.737	0.638	0.733	0.164	0.145	0.157	
设备名	T ₁			T ₂			T ₃			
	相名	A	B	C	A	B	C	A	B	C
负载损耗(kW)	0.996	0.668	0.692	1.439	1.000	1.066	1.051	0.902	0.806	
空载损耗(kW)	0.670	0.670	0.670	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	

表 5 线损计算分析结果(注:区域流入有功功率由 FTU₁ 测量上传)

Tab. 5 The analytic result of loss calculation

区段流入有功功率(kW)	区段流出有功功率(kW)	区段总线损(kW)	区段管理线损(kW)
769.385	745.600	23.785	7.117
区段技术线损(kW)	10kV 馈线线损(kW)	配电变压器铜损(kW)	配电变压器铁损(kW)
16.668	5.778	8.620	2.270

与以前的线损计算只能统计地给出线路总损耗相比,本方法针对各个配网设备进行数学建模,利用

现场监测数据可以实时地进行三相线损计算,能够在绝大部分情况下获得比基于统计的旧有方法精确许多的线损计算结果;同时可以计算出所有馈线段内各个设备的线损情况,使系统内的线损分布一目了然,有利于运行人员进一步把握配网系统的运行状况。

该方法在配电自动化配网重构或者负荷均衡化子模块中需要计算实时线损,其处理数据一般仅涉及有限几个时刻系统运行参数值,在当前的硬件系统支持下,其计算时间在工程上基本可以忽略不计,从而达到实时的效果。而在做月线损统计时,由于实时性要求不高,同时在月线损统计一般取 5 min 为一个数据点,一个月有 $30 \times 24 \times 12 = 8640$ 个数据点处理量的前提条件下,系统的计算时间也不是问题。

需要指出的是由于算法假定系统同一点三相电压对称且幅值相等,而实际配网系统运行时三相电压存在少许不对称度,这会给线损计算带来误差,但考虑到误差很小,计算结果满足工程计算要求,在此就忽略电压所带来的误差或者在计算完毕后对结果进行经验修正。

7 结语

随着配电自动化在电力系统中的开展,配网的线损管理变得越来越重要,降低线损是提高配网经济效益的重要因素,采取技术措施降低线损是电力企业追求效益最优化的必然趋势,而准确详细的线损理论计算和分析是采取降损措施的重要依据。本文结合配电自动化系统在配网中的应用,通过充分利用现场监控单元上传的三相监测数据,提出了按馈线段进行理论线损计算和分析的方法,它有利于提高线损理论计算的准确度,了解线损在系统中的分布情况,能够为配网规划设计、降损技术措施选择制定、网络运行方式优化选择以及在线防盗窃电等提供有力的依据。

参考文献:

- [1] 丁毓山,俞淳元. 线损管理系统及其软件设计. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [2] Levitin G, Kalyuzhny A, Shenkman A, et al. Optimal capacitor Allocation in Distribution Systems Using a Genetic Algorithm and a Fast Energy Loss Computation Technique [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2000, 15(2): 623 - 628.
- [3] 赵祖康,王伟. 中国城市配电网自动化与网络结构优化 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(19): 43 - 46.
- [4] 杨期余. 配电网[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [5] 许绍良,宋冶,苗竹梅,等. 电力网电能损耗计算导则 [M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [6] 杨秀台. 电力网线损的理论计算和分析 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1985.
- [7] 丁心海,罗毅芳,刘巍,等. 改进配电网线损计算方法的几点建议 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 57 - 61.
- [8] 张步涵,李可文,沙立华,等. 基于树状网潮流的配电网电能损耗计算 [J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(2): 58 - 60.
- [9] 朱发国. 基于现场监控终端的配网线损计算 [J]. 电网技术, 2001, 25(5): 38 - 40.
- [10] 刘健. 变结构耗散网络-配电网自动化新算法 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.

收稿日期: 2002-07-11; 修回日期: 2002-09-19

作者简介:

张锋(1977-),男,硕士研究生,研究方向为配电自动化系统;

江道灼(1960-),男,教授,主要从事 HVDC 微机控制技术、FACTS 及其应用技术、配电网自动化等方面的科研。

A real-time loss calculation for 10 kV distribution based on three-phase distribution monitored data

ZHANG Feng, JIANG Dao-zhuo, HUANG Min-xiang
(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: According to the practical situation of distribution automation system and some characteristics of distribution network, a new loss calculation method for 10kV distribution network is presented by making use of the three-phase distribution monitored data. This new method divides feeder line into feeder sections based on the variable structure dissipated network theory, then models every facility in these feeder sections. Combined with real-time monitored data, not only the calculation accuracy is improved, but also the detailed losses of feeder sections can be obtained, therefore, the loss distributing of distribution system can be required clearly. Consequently, the method can help personnel carry through distribution loss analysis and calculation simply and can give powerful reference in optimizing distribution system further.

Key words: distribution automation; Field Terminal Unit; loss calculation

华能集团大改组——亚洲最大独立发电商由中央直管

2月22日,从华能集团向记者证实,华能的改组方案和章程已经由国务院批准。这样,继去年国电大拆分,酝酿已久的华能集团的改组方案趋于明朗,亚洲最大的独立发电商也由此浮出水面。

华能集团内部人士称,此举意味着一直致力于做大做强的华能将迎来新一轮的扩张机遇。

华能集团的人士称:改组后的华能集团是在原中国华能集团公司及原国家电力公司部分企事业单位基础上整合成的国有重要骨干企业,主要成员单位包括:华能国际电力开发公司、华能国际电力股份有限公司等7个全资企业、3个内部核算单位、26个控股企业和4个参股企业。集团公司暂按人民币200亿元作为注册资本,不进行资产评估和审计验资。重组后华能的电力装机容量达到3797万千瓦。

此次,除电力产业外,华能集团还可以根据国家有关规定,从事国内外投资、融资业务。这样,华能会从一个电力供应商变为横跨多个领域的综合性公司,并且,进入了投融资行业。此前,华能集团已拥有信息、交通运输、新能源环保、金融、国际贸易、资产管理等产业公司。改组后,除经营华能集团及其企业中由国家投资形成并由集团公司拥有的全部国有资产(含国有股权),从事电源的投资、建设、经营和管理,组织电力(热力)的生产和销售外,还从事信息、交通运输、新能源、环保、贸易、燃料等相关产业、产品的投资、建设和生产经营。此外,经国家批准,自主开展外贸流经营、国际合作等业务。

华能的体制也随之发生改变。按照国家电力体制改革的要求,华能集团是自主经营、自负盈亏,以经营电力产业为主,综合发展的企业法人实体。华能集团对其全资、控股、参股企业进行改建和规范,建立资本纽带关系,实行母子公司体制。根据业务需要,可以按照国家规定在境内外投资设立全资或控股的子公司以及分公司、办事处等分支机构。

此前,华能由国电管理。改组后的华能集团实行总经理负责制,由中央管理,成为中央直接管理的国有重要企业。华能集团领导班子和领导人员由中央决定;资产管理及有关的财务关系由财政部负责。国务院向华能集团派出国有重点大型企业监事会,对其国有资产保值增值状况实施监督。

据称,国务院批准同意中国华能集团公司进行国家授权投资的机构和国家控股公司的试点。华能集团公司的资产与财务关系在财政部单列。集团公司为完成国家任务所需的资源和生产经营条件,凡属国家统一配置范围内的,均在国家相应计划中单列。华能集团改组后,国务院及有关部门对有关企业实行的原有优惠政策继续保持不变。

与此同时,中国华能集团公司还要根据国家产业政策和行业规划,制定发展战略,推动技术创新,增强市场竞争能力,最大限度地提高投资收益和经济效益,逐步发展成为实力雄厚、管理一流、服务国家、走向世界,具有国际竞争力的大型企业集团。