

# 布尔代数和数字逻辑在电气二次回路原理图分析中的应用

郑 兴，史方亮，钱 城

(江苏省宏源电力建设监理有限公司，江苏 南京 210036)

**摘 要：**简要论述了布尔代数和数字逻辑的概念，根据逻辑方程的基本理论提出将二次回路转化为方程的基本原则，将电气二次回路抽象成方程分析回路功能和回路故障，并提出建立变电站状态数据库的理论设想，达到设备运行监控和迅速检修排故的目的，并将分析方程的运用推广至智能化变电站的二次回路分析。

**关键词：**布尔代数；数字逻辑；二次回路；智能化变电站

## 0 引言

目前，变电站的微机保护应用已达到普及，智能电网的建设正得到大力推广。微机保护是用微型计算机构成的继电保护，而布尔代数和数字逻辑是计算机重要的理论基础之一。本文将布尔代数和数字逻辑为基础的逻辑方程直接应用到继电保护二次回路中，用方程的思想研究变电站的二次回路功能以及解决回路中的问题，并将应用推广至智能化变电站。

## 1 布尔代数

布尔（Boolean）代数，又称逻辑代数（Logic Algebra），是英国数学家布尔于 1854 年创建，用来处理命题之间的逻辑关系的代数系统。在逻辑代数中，命题用字母 A、B、C 等表示，称为逻辑变量。逻辑变量的真和假称为逻辑真值（Truth），用数码 1 和 0 表示，1 代表逻辑真，0 代表逻辑假。逻辑代数中的 0 和 1 是逻辑常量，它们不具有数的性质，无大小、正负之分，仅代表真假两种逻辑状态。

## 2 逻辑代数的基本运算和电路信号的表示

逻辑代数的基本运算有三种：与（AND）、或（OR）和非（NOT）。

### 2.1 非（NOT）

“非”的意思是否定。例如命题“开关断开”就是对命题“开关接通”的否定。若命题“开关接通”为逻辑变量 A，则命题“开关断开”称为变量 A 的“非”或“反”，用  $\bar{A}$  表示。

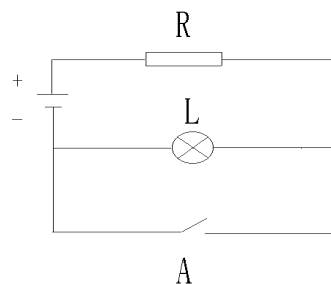


图 1 “非”的逻辑表示

在一个逻辑问题中，“若前提为真，结论则为假，若前提为假，则结论为真”，即结论与前提相反，这样的逻辑关系称为逻辑“非”。在图 1 中，开关接通与否是灯亮不亮的前提。如指定灯亮时变量 L 为 1，灯不亮时 L 为 0，开关接通时变量 A 为 1，开关断开时 A 为 0。则开关断开时，灯亮，开关闭合时，灯不亮。因此，有

$$L = \bar{A}$$

### 2.2 与（AND）

“所有前提均为真，结论才为真”的逻辑关系称为“与”逻辑。例如图 2 中的电路，只有当前提“开关 A 接通”与前提“开关 B 接通”皆为真时，结论“灯亮”才为真。

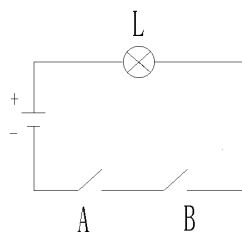


图 2 “与”的逻辑表示

逻辑代数中将“与”逻辑定义为逻辑乘法，并用乘号表示，对图 1 所示电路，有

$$L=A \times B$$

在不混淆的场合，也可以记为  $L=A \cdot B$  或  $L=AB$ 。

### 2.3 或 (OR):

“若一个或一个以上前提为真，则结论为真”的逻辑关系称为“或”逻辑。例如图 3 中的电路，只要前提“开关 A 接通”或“开关 B 接通”为真，结论“灯亮”就为真。这里的或是具有兼容性的或，即两个前提可以同时为真。

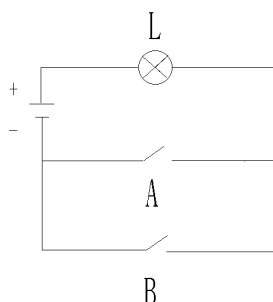


图 3 “或”的逻辑表示

逻辑代数中将“或”逻辑定义为逻辑加，并用加号表示，对图 2 所示电路，有

$$L=A+B$$

以上三种基本逻辑运算如在逻辑运算式中同时出现，其优先顺序为：非、与、或，必要时还可用括号加以提前。

### 2.4 逻辑代数的基本定律

$$\bar{0}=1 \quad \bar{1}=0 \quad 0 \cdot 0=0 \quad 1 \cdot 1=1$$

$$1 \cdot 0=0 \cdot 1=0 \quad 1+0=0+1=1$$

$$A \cdot 0=0 \quad A+1=1 \quad A \cdot A=A$$

$$A+A=A$$

电流流过的元器件方向，从正电源到负电源为一个回路。

(1) 所有的开关作为方程的右侧，即输入量；设备端口发出信号和指令的作为输入量，在方程右侧，例如保护装置发出的跳闸信号。

(2) 所有的线圈作为方程的左侧，即输出量；设备端口接受信号和指令作为输出量，在方程左侧，例如中央信号设备接受到事故信号。

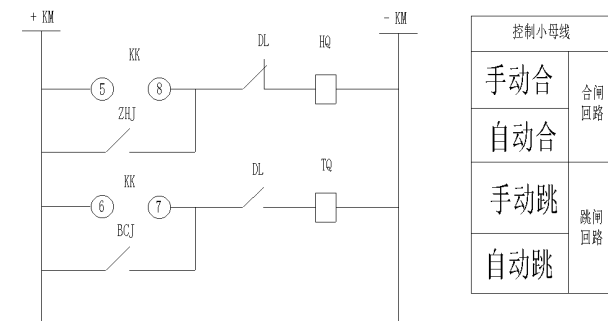
(3) 方程分为主方程和辅助方程。其中主方程个数等于回路中输出量的个数，辅助方程个数等于同名线圈的种数；用于表示图中有同名线圈和同名开关之间的关系。

(4) 一个回路中同时存在多个线圈时，确定某一线圈的方程时把其他线圈视为短路。

## 3.2 二次回路方程在回路功能分析中的应用

### 3.2.1 断路器控制的基本回路

断路器控制的基本回路见图 4。



+KM: 控制小母线正电源; -KM: 控制小母线负电源; KK: 控制开关; DL: 断路器辅助触点; ZHJ: 自动合闸继电器触点; BCJ: 保护出口继电器触点; HQ: 合闸线圈; TQ: 跳闸线圈

图 4 断路器控制的基本回路

## 3 二次回路原理图中分析方程的建立

### 3.1 回路方程的基本规程

回路图中的电气设备是符号是按无电压、无外力的正常状态表示。单稳态的机电设备为不带电状态；高压断路器的辅助触点均在其断开位置。顺着图中有两个线圈，分别为跳闸线圈 TQ 和合闸线圈 HQ，所以共两个方程。

合闸回路：

a、合闸回路输出量为 HQ，即方程左侧；

b、输入量有两个支路并联，分别为手动合闸  $KK_{5-8}$  和自动合闸 ZHJ，均为常开节点，故在方程中取其正；两回路为并联关系，所以  $KK_{5-8}$  和 ZHJ 之间取和，即“+”；

c、输入量 DL 为常闭开关，故在方程中表示区其反，即  $\overline{DL}$ 。

∴合闸回路方程为：

$$HQ = (KK_{5-8} + ZHJ) \cdot \overline{DL}$$

同理，跳闸回路方程为：

$$TQ = (KK_{6-7} + BCJ) \cdot DL$$

回路功能分析：

合闸操作：断路器断开时才可以进行合闸操作，

所以此时  $DL=0$ ， $\overline{DL}=1$

若为手动合闸，则  $KK_{5-8}$  合上，此时  $KK_{5-8}=1$

$HQ = (KK_{5-8} + ZHJ) \cdot \overline{DL} = (1 + ZHJ) * 1 = 1 * 1 = 1$   
即 HQ 带电，断路器合闸。

若为自动合闸，则 ZHJ 合上，此时  $ZHJ=1$   
 $HQ = (KK_{5-8} + ZHJ) \cdot \overline{DL} = (KK_{5-8} + 1) \cdot 1 = 1$   
 HQ 带电，断路器合闸。

断路器合闸后，其常闭辅助触点打开，常合辅助触点闭合，即  $DL=1$ ， $\overline{DL}=0$ 。

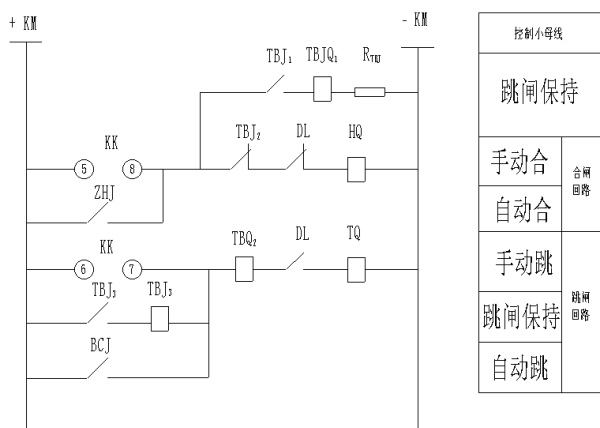
分闸操作：断路器合上时才可以进行合闸操作，此时  $DL=1$ ， $\overline{DL}=0$

若为手动合闸，则  $KK_{6-7}$  合上，此时  $KK_{6-7}=1$   
 $TQ = (KK_{6-7} + BCJ) \cdot DL = (1 + BCJ) \cdot 1 = 1$   
 即 TQ 带电，断路器跳闸。

若为保护跳闸，则 BCJ 合上，此时  $BCJ=1$   
 $TQ = (KK_{6-7} + BCJ) \cdot DL = (KK_{6-7} + 1) \cdot 1 = 1$

### 3.2.2 带串联防跳的断路器控制回路

带串联防跳的断路器控制回路见图 5。



+KM: 控制小母线正电源; -KM: 控制小母线负电源; KK: 控制开关;  
 DL: 断路器辅助触点; ZHJ: 自动合闸继电器触点; BCJ: 保护出口继电器触点

$TBJQ_1$ 、 $TBJQ_2$ 、 $TBJQ_3$ : 跳闸保持线圈;  $TBJ_1$ 、 $TBJ_2$ 、 $TBJ_3$ : 跳闸保持继电器触点;  $R_{TBJ}$ : 分压电阻; HQ: 合闸线圈;  
 TQ: 跳闸线圈

图 5 带串联防跳的断路器控制回路

图 5 所示的回路图中有 5 个线圈，因此共有 5 个主方程。又因为存在 TBJQ 的同名线圈，因此有一个辅助方程。

主方程:  $TBJQ_1 = KK_{5-8} \cdot TBJ_1$   
 $HQ = (KK_{5-8} + ZHJ) \cdot \overline{DL}$   
 $TBJQ_2 = TQ = (KK_{6-7} + TBJ_3 + BCJ) \cdot DL$   
 $TBJQ_3 = TBJ_3 \cdot DL$

因图中存在三个 TBJ 线圈和三个 TBJ 开关，故辅助方程为

$TBJQ_i = TBJ_j = \overline{TBJ_j}$ ; 其中  $i=1,2,3$   $j=1,3$   
 回路功能分析

正常分合闸操作和基本控制回路一致，不在赘述。

防跳功能分析：手动合闸时，开关  $KK_{5-8}$  合上，即  $KK_{5-8}=1$ ；若合闸的为故障线路，保护动作，即  $BCJ=1$ ，由跳闸线圈方程可知， $TBJQ_2=TQ=1$ ，即防跳线圈和跳闸线圈均带电。若合闸脉冲未接触，控制开关未复归，或  $KK_{5-8}$  触点卡住等情况，均会导致  $KK_{5-8}=1$ ，但是由辅助方程可知， $TBJQ_2=1$ ，则  $\overline{TBJ_2}=0$ ，带入合闸方程

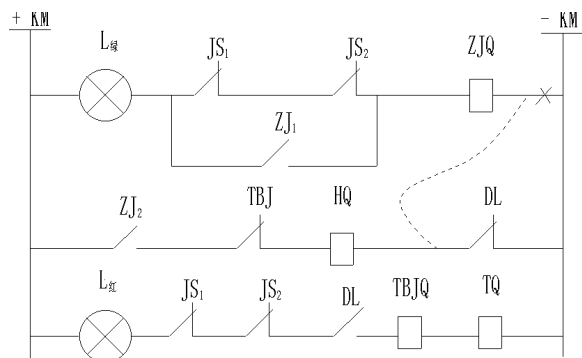
$$HQ = (1 + ZHJ) \cdot 0 \cdot \overline{DL} = 0$$

即通过防跳线圈，使断路器不会出现再次合闸的情况。

## 4 二次回路分析方程在回路故障分析中的应用。

二次回路分析方程在分析电路功能的过程中，是由开关的不同位置和信号的发出与接收得到整个电路的工作状态。相反的，也可以通过电路的工作状态，特别是分析故障状态电路，得出各个开关的位置和信号的发出与接收状态，从而迅速判断出故障问题。

某 110kV 变电所综合自动化改造过程中，在做某开关分合闸试验时，发现开关合闸后“红灯”、“绿灯”同时亮。回路图如图 6 所示。



+KM: 控制小母线正电源; -KM: 控制小母线负电源;  $JS_1$ :  $SF_6$  弹簧末储能闭锁触点;  $JS_2$ :  $SF_6$  压力低闭锁触点;  $L_{绿}$ : 绿灯;  $L_{红}$ : 红灯; ZJQ: 合闸继电器线圈;  $ZJ_1$ 、 $ZJ_2$ : 合闸继电器触点; DL: 断路器辅助触点; TBJQ: 跳闸保持线圈

图 6 某 110kV 变电所二次回路图

继电保护人员检查二次回路时,根据以往经验判断可能是机构中自带的防跳回路所致,但经检查发现,该防跳回路已在第一次投运时拆除(途中未画出)。经分析后发现,合闸回路中合闸继电器 KMQ 的不合理接线是造成故障的原因。合闸时通过正电源-绿灯- $JS_1$ 、 $JS_2$ -ZJQ 线圈-负电源形成动作回路,启动合闸线圈 HQ 合闸,同时合闸继电器 ZJQ 通过自身的常开触点 ZJ 形成自保持。从而使绿灯在合闸后依然亮。

由图可以看出,绿灯的分析方程为

$$L_{\text{绿}} = ZJ_1 + \overline{JS_1} \cdot \overline{JS_2}$$

从绿灯的分析方程可知,绿灯灭的条件为  $ZJ_1=0$  并且  $\overline{JS_1} \cdot \overline{JS_2}=0$ 。即,只和合闸继电器线圈 ZJQ 是否带电,以及  $JS_1$ 、 $JS_2$  是否闭锁有关,而和断路器的分合闸状态无关。由正常功能可知,断路器分闸时,绿灯应亮,而合闸时,绿灯应灭,即

$$DL=0, L_{\text{绿}}=1; DL=1, L_{\text{绿}}=0$$

因此需在方程中引入表达断路器状态的变量,又因为断路器的分、合对应绿灯的亮、灭,两者是“非”逻辑,所以应将绿灯的对应方程修改为

$$L_{\text{绿}} = (ZJ_1 + \overline{JS_1} \cdot \overline{JS_2}) \cdot \overline{DL}$$

对应到电路中,即将断路器的常闭触点接入绿灯回路,如图 6 中虚线所示。

## 5 变电站全状态数据库建立的理论设想

从上世纪 60 年代中后期开始,英国、澳大利亚和美国的一些学者开始倡导研究微机继电保护装置,到 80 年代,微机保护在硬件结构和软件技术方面日趋成熟,并在一些国家推广应用。我国微机保护的研究起步于 20 世纪 70 年代末期,到 80 年代末,微机保护,特别是输电线路微机保护已达到大量实用的程度。

微机保护的基本原理是把被保护元件输入的模拟电气量经模/数转换器(A/D)变换成数字量,利用计算机进行处理和判断。而逻辑函数正是计算机运行的理论基础。因此,可以设想将一座变电站所有的数字量及其所对应的运行状态进行统计,建立起相应的运行状态数据库,从而方便运行状态的分析 and 事故原因的确定。

### 5.1 数据库初步建立阶段。

全状态数据库的初步建立及其对应状态统计工作主要在设计阶段完成。设计人员在设计好图纸后,对每一个开关量进行编号,并统计出所有回路的分析方程。每个开关量仅存在 0 或 1 两种状态(例如触点的打开、闭合),因此可以用一个 bit 位进行标示。由计算机存储原理可知,

$$1 \text{ Byte} = 8 \text{ bit}$$

$$1 \text{ KB} = 1024 \text{ Byte} = 8 \times 1024 \text{ bit} = 8192 \text{ bit}$$

所以,一般最多几个 KB 的存储容量即可标示一座变电站所有的开关量信号。然后,对所有的开关量组合情况进行依次代入分析方程,去除无意义的开关量信号组合。

例如,对于一座有  $n$  个开关量信号的变电站,需依次从  $\underbrace{[000 \cdots 000]}_n$ 、 $\underbrace{[000 \cdots 001]}_{n-1}$  一直分析到  $\underbrace{[111 \cdots 111]}_n$ ,去除其中无意义的组合,仅保留正常

运行状态下开关量的组合和故障状态下的开关量组合,并将其对应的光、声等信号状态录入数据库。开关量代入分析方程的计算量较大,可由计算机完成。

### 5.2 数据库调试阶段。

全状态数据库的调试阶段主要放在变电站的建设阶段。在变电站建设过程中,由调试和运行人员在设备调试过程中验证初步建立阶段保留的开关量组合与其对应的声、光信号是否一致,并录入相应故障状态下的事故处理方法。

### 5.3 数据库使用和维护阶段。

全状态数据库的建立主要便于运行过程中对运行状态的监控和事故的处理。在正常运行过程中,由计算机对全站开关量的状态参照数据库内对应的运行状态数据进行实时监控。当运行设备发生故障时,可由计算机根据故障信息(声、光等信号)在数据库中搜寻其对应的开关量组合方式,从而迅速确定故障原因,并根据调试阶段录入的处理方法快速进行检修排故。同时,对实际运行过程中发现的未录入数据库的运行方式和故障状态,可由运行人员补充录入数据库,不断维护和丰富数据库的数据。

## 6 分析方程在智能变电站中的应用

智能变电站是采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备,以全站信息数字化、通信平台网

络化、信息共享标准化为基本要求,自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和检测等基本功能,并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级功能的变电站。

智能变电站的特点之一就是光缆取代电缆,数字取代模拟。常规变电站的二次设备与一次设备之间、二次设备间采用电缆进行连接,电缆感应电磁干扰和一次传输过电压可能引起二次设备运行异常,长电缆的电容耦合干扰一级二次回路两点接地都可能造成继电保护误动作。

智能变电站与常规变电站相比,增加了过程层网络,通过合并单元、智能终端实现就地采集与控制,光缆取代了常规变电站的大量长电缆。通过GOOSE方式实现各保护装置之间信息的交互、跳闸出口等,原有传统的端子概念消失,取而代之的是GOOSE虚端子,通过虚端子的逻辑连线实现保护装置之间的配合。端子排及电缆接线简化为光口及光缆连接。由于逻辑回路取代了大量的继电器回路,以往的保护功能投退及跳闸出口等硬压板,也可被软压板取代,相应功能由软件内部的控制字来设置实现。

从分析方程中的输入量、输出量定义可以看出,方程中的输入、输出量实际是对逻辑功能是否实现的定义,并不涉及此功能的完成是由硬件或者软件实现的,并且,方程并不反映其对应回路的物理连接形式,即,同一回路中各个设备之间,是由电信号、光信号或网络报文方式传输,甚至一个回路中同时存在数种传输方式,只要回路功能一致,均可以由同一方程描述。所以,分析方程打破了软件和硬件,以及不同介质连接设备之间的界限,完全从逻辑和功能实现的角度分析和解决问题。智能变电站中的开关量和模拟信号都采用通信报文方式传输,不再使用电缆连接,其特定的输入输出信号采用配置文件方式固化在装置中,对设备而言,报文发送或接受的每一个独立信号都被虚拟成一个信号端子,即虚端子。因此,可以将发送报文的端子定义为输入量,将接受报文的端子定义为输出量,即可建立起不同于传统二次回路中以电信号作为传输信号,而是以报文为传输信号的分析方程。

#### 参考文献:

[1] 黄正瑾.计算机结构与逻辑设计[M].北京:高等教育出版社,2001.

- [2] 刘学军.继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 能源部西北电力设计院.电力工程电气设计手册电气二次部分[M].北京:中国电力出版社,1991.
- [4] 戴宪滨,杨志辉.发电厂及变电站的二次回路[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [5] 史国生.电气二次回路及其故障分析[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [6] 田国政,谭伟.微机保护装置的发展[J].电网技术,2006,30(S2).
- [7] 国家电网公司基建部.智能变电站建设技术[M].北京:中国电力出版社,2011.

#### 作者简介:

郑兴(1986年-),男,江苏南京人,本科,助理工程师,长期从事变电工程监理和项目管理工作, Email: seu\_zx@163.com;

史方亮(1966年-),男,江苏溧阳人,本科,工程师,长期从事输变电工程监理、项目管理和工程咨询工作;

钱城(1975年-),男,江苏南京人,本科,工程师,长期从事输变电工程监理、项目管理和设备监造工作。