

海底电缆架空线混合线路的保护

广东省电力勘测设计院 张华贵

一 保护通道选择

广东沙角电厂有两回220kV海底电缆架空线混合线路，一回是沙角至番禺，另一回是沙角至中山，见图1所示。沙番线长46公里，沙中线长72公里，其中海底电缆长3公里，埋下珠江出口处。海底电缆不同于陆地埋设的电缆，继电保护方案选择更为困难，关键问题是保护通道的限制。

1. 电力载波通道。由于电力电缆比架空线的波阻抗小很多倍，利用电力电缆作高频通道，因波阻抗很不匹配，则在两者的连接处产生很大的反射衰耗，尤其电力电缆在其间，两个反射点产生的衰耗更大。为了解决电力电缆与架空线连接处波阻抗的不匹配，在连接处要安装耦合设备。如果不利用电力电缆作高频通道，还要敷设一条海底高频电缆。从技术上看，电力载波通道在混合线路上将遇到很大的困难。

2. 光纤通道。混合线路上，由于架空线部分要敷设光缆或采用地线光纤，同时过江电力电缆也要敷设一条海底光缆。从技术上看，光纤通道在混合线路上也将遇到很大的困难。

3. 微波通道。沙角至番禺的微波直线距离为36公里，沙角至中山的微波直线距离为37公里，均无须中继站。由于其间通话的需要，要建立微波电路，除供通信、运动信息使用外，当然继电保护也可利用此微波电路作通道了。

综上所述，本工程继电保护选用微波通道比之载波通道或光纤通道，无论从技术上和经济上看，都是合理的。

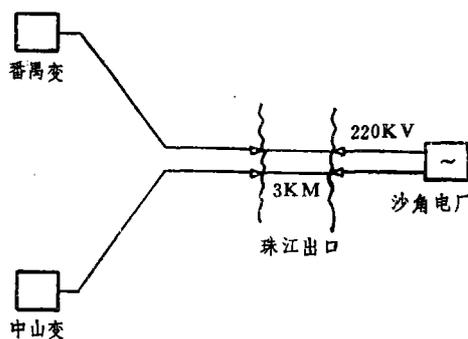


图 1

二 微波保护方案选择

沙角电厂的220kV沙番、沙中混合线路是送电珠江三角洲的两条重要电力线路，其中尚有海底电缆，为了安全可靠，宜配置两套主保护，正如上节所述选用了微波通道，也就应配两套微波保护。海底电缆由日本提供，微波保护也考虑配套进口。日本提供的保护方案为2套FM调频式的微波电流差动保护和一套距离后备保护。由于进口微波保

护价钱贵，为了节约外汇和发展国产的微波保护，每条线路只进口一套FM微波电流差动保护。另一套为广东院与上继厂合作研制的微波允许超程方向距离零序保护兼后备。现分别介绍如下。

三 FM微波电流差动保护

微波电流差动保护是以克希荷夫第一定律为基础的电流差动保护。FM是分相式保护，它比常用的相位比较保护性能好，因为相位比较保护只比较两侧电流的相位而不同时比较两侧电流的大小。又为了安全可靠，相位比较要两次比相，在保护的速动性和安全性上不及电流差动保护。FM电流差动保护动作时间约30毫秒，它还有一系列的优点：

1. 受负荷影响小。
2. 可用于单侧电源线路，两侧或三侧电源线路。
3. 可用于同杆并架双回路，具有跨线故障选相功能。
4. 可允许具有较大接地电阻的单相故障选相功能。
5. 可用于长距离线路。

FM电流差动保护的动作为下列(1)式：

$$|\Sigma i| - k(\Sigma |i| - \eta |\Sigma i|)^+ - (\Sigma |i| - \mu k)^+ - k_e |i_e| > k \quad (1)$$

式中， $|\Sigma i| = |i_{\phi M} + i_{\phi N}|$

$$\Sigma |i| = |i_{\phi M}| + |i_{\phi N}|$$

k, η, μ 制动系数

$i_e = 3i_o - 3i_o'$ 为误差电流， k_e 为系数

$$(G)^+ = \begin{cases} G, & \text{当 } G \geq 0 \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } G < 0 \text{ 时} \end{cases}$$

K 电流整定值(安)

式中，左方第一项为动作量，其它负号的各项为制动量，微波通道正常时，误差电流 $i_e = 0$ 。这样，FM继电器具有制动性能，当用比率特性表示时，见图2。

从继电器的动作方程式可见，外部故障时，理想情况下，流入 i_{ϕ} = 流出 i_{ϕ} ，继电器不会动作。内部故障时，理想情况下，当制动量为0，继电器的动作电流大于 k 整定电流(安)时，继电器便动作。

FM继电器 k 整定电流(安)，当CT付方为1安时，整定动作电流范围为0.5~2.0安。

由于本工程混合线路有海底电缆，整定 k 动作电流值时，要躲过线路的电容电流，该电力电缆的一次电容电流为每公里14安，3公里共为42安。其次应保证在最小短路电流时，内部故障的灵敏度大于2。故可见FM电流差动保护整定简单，这也是电流差动保

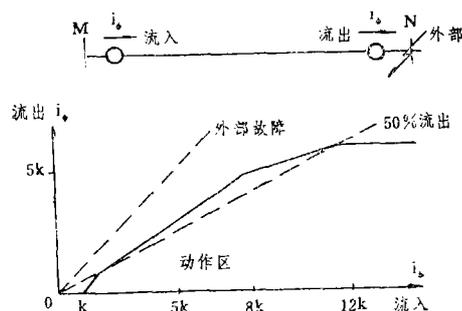


图2 比率特性

护的一大优点。

两侧电源线路的FM电流差动保护方框图为：

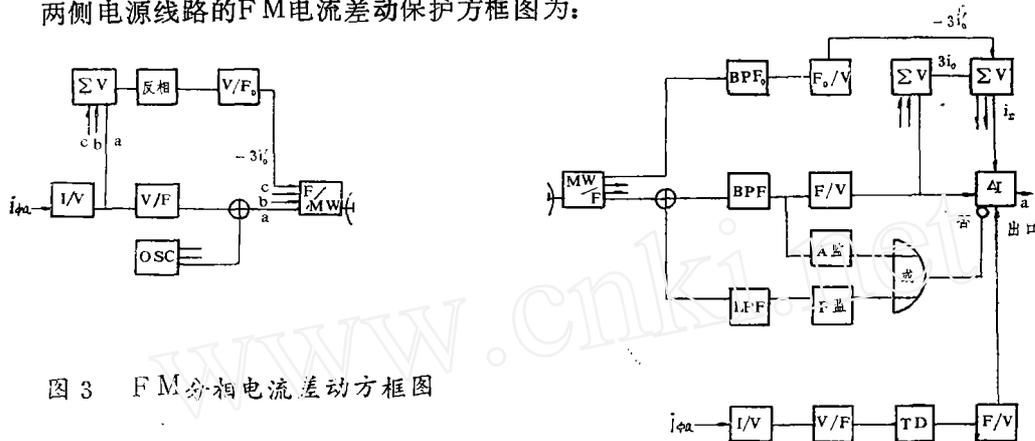


图3 FM分相电流差动方框图

图例：

I/V——电流电压变换器 V/F—调频 F/V—解调 ⊕—混频器
 BPF—带通滤波器 LPF—低通滤波器 OSC—导频425Hz振荡器 ΣV —加法器
 TD—时间延迟补偿器 A监—收讯电平监视器 F监—导频频率监视器
 ΔI —电流差动元件 ○—否门

从方框图可见，FM电流差动保护使用了4路微波通道，分相差动每相占用一路通道，这3路通道的方框图是相同的，今只示出其中一相。它从CT二次输入的电流先变换为电压，再由电压调制为音频，采用 $f_0 = 1900\text{Hz}$ ，带宽为 $1900 \pm 1000\text{Hz}$ ，其中， $f_H = 2900\text{Hz}$ ， $f_L = 900\text{Hz}$ 是频率的上、下限值。由电流变量导致电压变量 ΔV ，产生了调频量 $(f_0 \pm \Delta F)$ ，经微波发讯机送往对侧。对侧收讯后，经F/V解调变换成差动元件的输入信号。对侧CT二次电流经I/V变换及V/F变换，再经时间延迟补偿后，也经F/V解调变换成差动元件的输入信号。

第4路微波通道是将各相电流I/V变换后的输出量相加并反相，经V/F₀变换后即把与 $-3i_0'$ 对应的调频量经微波发讯机送往对侧。对侧收讯后，经F₀/V解调及 ΣV 各相相加后变换成对应误差电流 $i_e = 3i_0 - 3i_0'$ 的量也作为差动元件的输入信号。

差动元件把对应 $i_{\phi M}$ ， $i_{\phi N}$ 及 i_e 的三个输入量在继电器内组成为动作方程式，见(1)式所示。

理想微波通道情况下， $i_e = 0$ ，当噪音干扰通道时， $i_e \neq 0$ 。在差动元件中，误差电流 i_e 是乘以系数 k ，作为一项制动量，它是与噪音大小成比例的。由此可见，此第4通道的功能在这里不是作为零相差动元件用，而是作为分相电流差动元件的制动量，以防止噪音干扰时分相差动元件误动作。

此外，在分相差动中，还采用了两种监视。其一是收讯电平监视，以防止微波电路的中断或过大衰落使差动元件误动；其二是噪音监视，这是使用425Hz作导频，与分相

V/F的输出频率混频后一同经微波传输。这样，当有噪音侵入到分相通道时，可检出干扰噪音，防止差动元件误动。监视闭锁回路采用自动复归，当通道恢复正常时，则自动解除闭锁。

FM微波电流差动保护还配有 $V_{\phi-\phi}$ 及 $3I_0$ 起动元件， V_{AB} 、 V_{BC} 、 V_{CA} 作三相及两相短路起动用， $3I_0$ 作单相短路及两相短路接地起动用。经校验，本工程两条线路用低电压元件作起动用灵敏度仍足够。否则，要改用更灵敏的起动元件作三相及两相短路起动用。

FM微波电流差动保护还有专用的V/F试验设备，试验方便。

沙番、沙中线两套FM微波电流差动保护均已在1988年投产。投产以来，情况正常，运行单位满意。

四 微波允许超程方向距离零序电流保护

微波距离零序保护不同于微波电流差动保护，它可以作全线速断的主保护兼后备保护，它只用一路微波通道，而且当通道失效时仍可起后备保护作用。它是最广泛使用的微波保护，价钱也比电流差动保护低。

距离零序保护有闭锁式和允许式。微波通道与电力线载波通道不同，为了安全起见，微波距离零序保护选用了允许式。而允许式又分超程和欠程，由于方向零序电流保护的特性，适宜作超程。广东院与上继厂合作，选用了厂家的PLH—11A距离零序保护屏，它是相间距离和零序电流三段式保护，适宜作微波允许超程方向距离零序电流保护。

由于PLH—11A保护屏并不具有允许回路，为此我们要在屏上加装允许回路，因是整流型保护屏，我们只增加了4个中间继电器装在屏上，便构成了允许回路。其中两个中间继电器用在发讯回路中，两个中间继电器用在收讯回路中。

又因距离零序保护屏是接点出口，它和微波设备不能直接连接，其间需要一个音频保护接口装置，把保护出口接点的开闭状态变换为音频信号后，才可与微波设备连接。由上继厂研制成的音频保护接口装置是YPSF型，并已经过几次改进，它是移频键控式的。正常时，保护不动作，它发一个监频信号，当保护动作时，它转发一个跳频信号，当对侧从收到监频转收到一个跳频信号时，便知对应侧的保护已动作。这样，线路内部故障时，两侧均从监频转收到跳频信号，两侧允许回路动作构成出口掉闸。线路外部故障时，由于近故障点一侧的方向距离零序电流保护不动作，两侧允许回路不会构成出口掉闸。见图4所示。

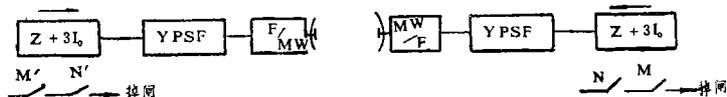


图4 允许超程距离零序保护方框图

YPSF型音频收发讯机采用四线制，频率可在500Hz至3000Hz选取监频和跳频。

它的输入、输出接口与微波设备的阻抗匹配为600欧，输入输出电平也要与微波设备相配合。音频收发讯机要求发讯频率稳定，收讯滤波性能好，直流电源可靠，结构美观，制造质量好。本工程的YPSF型音频保护接口装置也是装在同一块保护屏上。

由於本工程沙角电厂侧的微波楼与保护屏所在的控制楼相距1公里，而YPSF音频保护接口装置在保护屏上，为此YPSF与微波设备相连是经过15kV/分耐压的音频电缆和音频隔离变压器互连的，以保证设备和人身的安全。在中山、番禺侧因保护屏与微波设备的距离近，只用音频电缆直接连接。音频电缆是绞对的屏蔽电缆。

微波距离零序保护比微波电流差动保护动作慢一些，因经YPSF音频接口装置动作时间增大了约15毫秒。故微波电流差动保护作为主1保护，而微波距离零序保护作为主2兼后备保护。

五 综合重合闸

本工程两回混合线路配有综合重合闸，它是国产的。其中，FM分相电流差动保护与它的配合有一些特别之处，分相电流差动保护每相有两对出口接点，一对供起动重合闸，一对与重合闸的阻抗选相元件接点并联，这样可加强对较大的接地电阻的选相能力。而当FM电流差动保护退出运行时，距离零序保护与综合重合闸则按习惯配合运行，无特别之处。

两回混合线路的综合重合闸没区分海底电缆故障不重合而架空线部分故障则重合的功能。因为要区分是电缆故障，则必须装设电缆专用的导引线纵差保护，而导引线要埋入江底，且还要装设远方传送装置，例如架空线部分的电力载波通道把导引线纵差保护动作的信号分别送往两侧重合闸去闭锁。由於海底电力电缆故障少，而架空线部分故障多，加上节省投资，本工程无装电力电缆专用的导引线纵差保护而仍投入自动重合闸运行。

六 微波通道

微波通道是微波保护的重要环节。从经济上看，最好保护与通话共用；从技术上看，要求微波通道可靠，中断率不允许超过国际无线电咨询委员会CCIR的规定。

本工程使用的是进口微波设备，是数字微波，数字微波比模拟微波更先进和可靠、质量好。它是时分制，工作频率范围是8GHz频段(7725~8275MHz)，双机运行。并配置有一、二、三次多路复用设备，从64kb/s至2Mb/s至8Mb/s至34Mb/s的速率变换、共480路。在64kb/s处有音频接口，内含模数变换、可接FM电流差动保护的音频部分。本工程由於微波跨过海面，而两岸地形平坦，微波反射线得不到阻挡而引起衰耗大，不采取措施便不能满足电路的质量要求，为此采用了如下一些改进措施。

1. 天线直径采用3米，提高天线增益。(下转9页)

路,对滤波结果影响不大。

3. 实验表明,影响卡尔曼滤波收敛时间和精确度的主要噪声参数是 P_0 和 R_0 ,其他参数影响不大。

4. 由卡尔曼滤波性质得出,不同的噪声参数能够求得相同的增益系数,使噪声参数的选择比较容易而且省时。

5. 实验结果表明,三状态的电流滤波较二状态的电压滤波效果更好一些,这说明扩大状态量,可以进一步提高滤波精度和收敛速度。

参考文献

1. "Алгоритмические Составляющие Токов Короткого Замыкания В Сетях Сверхвысокого Напряжения" «Электричество» No. 9. 1987
2. "Application of Kalman filtering in Computer relaying" IEEE Vol pas-100 No7. 1981
3. Kalman filtering applied to power system measurements for relaying" IEEE vol pas-104, No. 12. 1985
4. "Application of adaptive Kalman filtering in fault classification distance protection, and fault location using microprocessor" IEEE Pas-107 No. 1. 1988
5. "现代控制理论基础" 王照林等编 国防工业出版社, 1981, 2
6. "最佳控制的数学方法及其应用" 钟翥编: 江苏科学技术出版社, 1982, 6

~~~~~

上接36页

2. 采用空间分集技术。空间分集就是使用高低不同位置的天线,利用不同的微波直线传输路径,而两条直线传输的衰落情况不同,可择优选用。

3. 采用频率分集技术,即两条微波直线传输的频率不同,衰落不同。

以上这些措施保证了本工程微波电路的质量,大大地改善了收讯的效果。

附带指出,微波电路的建设主要为了通话,全电路从沙角电厂至中调所,有很多微波站,而线路微波保护只复用其中一段,这一段比只有通话段要求更高。本工程采取上述措施使沙角至中山段,沙角至番禺段具有更好的效果,提高了收讯电平,减少了误码率,这就为微波保护的可靠运行提供了微波通道的良好条件。

## 七 结 语

220kV 电力电缆架空线混合线路的保护可用微波保护。由于220kV 电力电缆的重要性,装设两套微波保护,其中一套进口,一套国产。在我国,只要定型生产音频保护接口装置,则微波允许超程方向距离零序电流保护大有作为,将为我国电力事业发挥应有的作用。