

母线间电容对铁磁谐振的影响

李云阁, 施 围

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

Influence of Capacitive Coupling between Busbars on Ferroresonance

LI Yun-ge, SHI Wei

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 利用 EMTF 软件模拟了相间电容对中性点接地系统空母线上铁磁谐振的影响。结果表明, 相间电容不仅使谐振的概率增大, 而且使谐振电压的幅值增加。因此在分析铁磁谐振现象时不能忽略相间电容。另外, 在工程分析中, 可取相间电容相等。

关键词: 中性点接地系统; 铁磁谐振; 相间电容

中图分类号: TM864

文献标识码: A

Abstract: The capacitive coupling between busbars has an effect on ferroresonance occurring on neutral-grounded systems. In this paper, the effect is studied by software EMTF. Results show that the capacitive coupling not only increases the possibility of ferroresonance, but also raises the amplitude of the resonant voltage. It is advised that capacitive coupling may be not ignored when ferroresonance is concerned. In addition, the coupling capacitances among three phases could be taken to be equal in practice.

Key words: neutral-grounded system; ferroresonance; capacitive coupling

1 前言

铁磁谐振使得电压急剧增加, 电流大幅上升, 可能导致变压器或电压互感器烧毁、外绝缘闪络或避雷器爆炸等事故。通常分析铁磁谐振的方法有图解法、相平面法、物理模拟法、数字模拟法、微分方程数值解法、平均法、谐波平衡法等。近年来, 铁磁谐振中的分形和混沌现象是热门的研究内容^[1-3]。

铁磁谐振回路是一非线性系统, 其中的非线性电感大大增加了分析的困难程度和复杂性。如果再考虑相间电容, 在很多情况下分析无法进行。因此, 在以前的研究中很少考虑相间电容的影响, 尤其是在图解法和解析法中。

笔者将通过一个典型的中性点接地系统分析母线间电容对铁磁谐振的影响。这些电容使谐振回路

成为一个复杂的立体系统, 无法用解析法研究, 因此选择暂态模拟程序 EMTF 进行分析。

2 谐振回路及参数

图 1 为典型的发生谐振的中性点接地系统变电站主接线图。母线分为 I 和 II 两段。CB₀ 为母联断路器, CB₁ 和 CB₂ 为线路断路器, 其断口均装有均压电容。DS 为隔离开关。PT₁ 和 PT₂ 分别为与两段母线相连的单相电磁式电压互感器, 它们由矽钢片叠加而成, 因而是一种非线性电感元件。

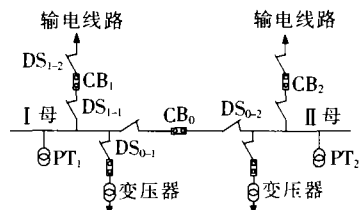


图 1 发生谐振变电站的主接线

当发生断路器或隔离开关操作, 使得母线通过断路器的均压电容供电时, 暂态过程诱发铁磁谐振。以 I 母为例, 发生谐振的操作可总结如下:

- (1) 隔离开关 DS₀₋₁, DS₀₋₂, DS₁₋₁, DS₁₋₂ 在闭合位置; 断路器 CB₀ 和 CB₁ 其中之一已经开断, 当分另一个时, 谐振发生。在某些变电站, 可能发现现象(2)。
- (2) 然后分上述 4 个隔离开关之一, 谐振再次发生。

在以上的操作过程中, 变压器断路器和隔离开关保持在分闸位置。

在 II 段母线上发生铁磁谐振的情况与 I 母极为相似。实际上, 图 1 是中性点接地系统变电站中由于 PT 铁心饱和而出现铁磁谐振现象的通用电路。

由图 1 可得中性点接地系统空母线上的通用铁磁谐振电路见图 2, 分断路器 CB 时谐振发生。A, B, C 相子回路完全相同, 为了使等效电路清晰, 图 2 中省略了 B, C 相子回路。以一 110 kV 变电站为例, 系统电源电压 $u=63\ 508\text{ V}$ (有效值)。断路器断口均压

电容 C_b 为 900 pF, C_{ab}, C_{bc}, C_{ca} 为母线之间的耦合电容, 实测结果分别为 126, 126, 86.2 pF, 母线对地电容 C_g 的实测值为 583.6 pF。

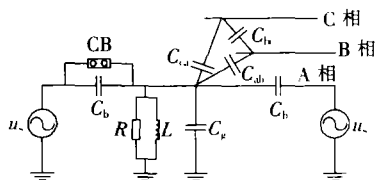


图2 谐振电路

PT励磁支路由并联的电阻 R 和非线性电感 L 两部分组成。 R 为 80 M Ω , 对应损耗值 50 W。从二次侧看, L 的电流-磁通励磁特性见图3。

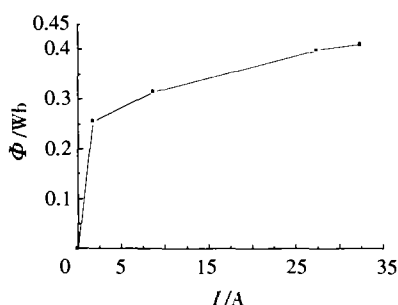


图3 非线性电感的励磁特性

3 谐振电压分布

3.1 分断路器

分图2中的断路器CB, 如不发生谐振, A, B, C三相母线稳态电压为正弦波, 幅值分别为 61 180, 59 600, 61 092 V, 中间相电压略低。如忽略相间电容, 三相电压均为 69 611 V, 相间电容使得母线正常稳态电压下降约 13%。

分断路器后, 系统未必能过渡到正常稳态, 实际情况需通过模拟确定。分断路器前, 其中通过 1 mA 数量级电流, 因此分断路器时, 截流可发生在任意相角, 即开关动作相角服从均匀分布。为了比较相间电容的影响, 用EMTP模拟了以下3种情况: ①忽略相间电容, 即 $C_{ab}=C_{bc}=C_{ca}=0$; ②相间电容相等, 即 $C_{ab}=C_{bc}=C_{ca}=126$ pF; ③相间电容为实际值, 即 $C_{ab}=C_{bc}=126$ pF, $C_{ca}=86.2$ pF。

在每种情况下模拟 500 次分断路器的操作, 系统达稳态时, 母线稳态峰值电压分布见表1。可以看出, 在绝大部分情况下, 母线稳态峰值电压远远大于正常电压, 即发生了谐振。在上述三种情况下, 母线峰值电压的分布范围分别为 0.8~4.8, 0.9~6.45, 0.85~6.55 p.u.。

如不考虑相间电容, 分断路器后三相母线电压分布一致, 都存在图4所示3种稳定状态: ①正常工作状态, 电压幅值为 69 611 V, 出现的概率为 7.47%。②一种轻微谐振状态, 母线稳态电压波形为两个分量的叠加; 幅值为 69 611 V 的工频分量和幅

表1 分断路器后母线稳态峰值电压分布

相间电容	A相		B相		C相	
	峰值电压/p.u.	统计次数	峰值电压/p.u.	统计次数	峰值电压/p.u.	统计次数
$C_{ab}=0$	0.80	46	0.80	37	0.80	29
$C_{bc}=0$	0.85	6	0.85	11	0.85	12
$C_{ca}=0$	4.80	448	4.80	452	4.80	459
$C_{ab}=126$ pF	0.9	3	0.90	1	0.90	5
$C_{bc}=126$ pF	5.7	1	6.25	5	0.95	1
$C_{ca}=126$ pF	6.4	5	6.40	3	6.30	3
	6.45	491	6.45	491	6.45	491
	0.90	1	0.90	1	0.85	8
$C_{ab}=126$ pF	1.00	1	5.70	1	0.90	2
$C_{bc}=126$ pF	5.55	1	6.25	8	6.05	490
$C_{ca}=86.2$ pF	6.15	489	6.35	1		
	6.20	8	6.55	489		

注: 1 p.u.=89 815 V

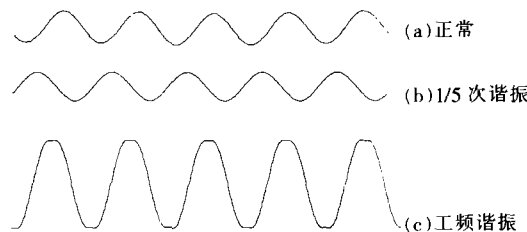


图4 忽略相间电容时, 分断路器后电路的各种状态

值为 5 796 V 的 1/5 次谐波分量, 出现的概率为 1.93%。③工频谐振, 稳态峰值电压为 430 529 V, 出现的概率为 90.6%。

如取相间电容均为 126 pF 时, 由于三相对称, 分断路器后三相母线电压分布一致。总体上看, 电压的幅值明显增大, 但电压仍然分布在两个区间: ①在区间 0.9~0.95 p.u., 正常或 1/5 次谐波出现的概率为 0.67%; ②在区间 5.7~6.45 p.u., 工频谐振出现的概率为 99.33%。与不考虑相间电容的情况相比较, 工频谐振的概率增加。

实际上, 由于三相母线通常水平排列, 母线间的电容不相等, 分断路器后三相母线电压分布不完全一致。与三相电容相等的情况比较, B 相电压升高, 从 6.45 p.u. 升到 6.55 p.u.; 而 A, C 相电压下降, 分别从 6.45 p.u. 降至 6.2 p.u. 和 6.05 p.u.。这种 B 相电压高于 A, C 相电压的情况恰恰与稳态时的情况相反。但总体上看, 电压仍然分布在两个区间: ① 0.85~0.9 p.u., 正常或 1/5 次谐波出现的概率为 0.8%; ② 5.7~6.45 p.u., 工频谐振出现的概率为 99.2%, 与三相电容相等的情况在同一水平。

3.2 分隔离开关

分图2中断路器, 系统进入正常稳态后, 再分与断路器相连的隔离开关, 相当于彻底断开一个电源。如不发生谐振, 三相母线 A, B, C 相电压分别为 46 333, 44 595, 46 289 V, B 相仍为最低。如忽略相间电容, 三相母线电压均为 56 815 V。相间电容使得母线稳态电压下降约 19%。

与分断路器情况相同, 由于可能激发谐振, 分隔

离开关后的实际稳态电压需通过模拟确定。在与前述相同的3种相间电容情况下,模拟了分隔离开关的操作。每种情况下模拟500次操作,稳态时母线峰值电压见表2。可以看出,在大部分情况下,系统达稳态时母线峰值电压远远大于不发生谐振时的情况。在三种情况下,母线峰值电压的分布范围分别为0.65~2.55,0.5~3.1,0.55~3.1 p.u.。

表2 分隔离开关后母线稳态峰值电压分布

相间电容	A		B		C	
	峰值电压/p.u.	统计次数	峰值电压/p.u.	统计次数	峰值电压/p.u.	统计次数
$C_{ab}=0$	0.65	358	0.65	342	0.65	349
$C_{bc}=0$	2.55	142	2.55	158	2.55	151
$C_{ca}=0$	0.50	172	0.50	172	0.50	172
	0.70	83	0.70	75	0.70	72
$C_{ab}=126 \text{ pF}$	0.75	27	0.75	28	0.75	23
$C_{bc}=126 \text{ pF}$	2.85	23	2.85	27	2.85	28
$C_{ca}=126 \text{ pF}$	3.05	52	3.05	13	3.05	55
	3.10	143	3.10	185	3.10	150
	0.55	174	0.50	174	0.55	174
	0.70	74	0.70	63	0.70	93
$C_{ab}=126 \text{ pF}$	0.80	21	0.75	27	0.75	21
$C_{bc}=126 \text{ pF}$	2.80	24	2.85	21	2.80	27
$C_{ca}=86.2 \text{ pF}$	2.95	39	3.05	116	2.95	39
	3.00	168	3.10	99	3.00	146

如不考虑相间电容,分隔离开关后母线电压存在两种稳定状态:①正常工作状态,电压幅值为56 815 V,出现的概率为69.93%。②工频谐振,稳态峰值电压为226 065 V,出现的概率为30.07%。

当考虑相间电容时,与分断路器情况相同,电压的幅值明显增大。总体上看,电压仍然分布在两个区间:①0.5~0.75 p.u.,正常状态。当相间电容相等时,出现的概率为54.93%;如不相等,则为54.73%。②2.8~3.1 p.u.,工频谐振。当相间电容相等时,出现的概率为45.07%;如不相等,则为46.26%。

5.3 母线间电容的影响

为了更直观地比较母线间电容对工频铁磁谐振的影响,将3.1和3.2的有关情况汇总成表3。

从表3可以看出,不论是分断路器还是分隔离

表3 母线间电容的影响

相间电容	工频谐振概率/%		谐振电压最大峰值/p.u.	
	分断路器	分隔离开关	分断路器	分隔离开关
$C_{ab}=0$ $C_{bc}=0$ $C_{ca}=0$	90.6	30.07	4.8	2.55
$C_{ab}=126 \text{ pF}$ $C_{bc}=126 \text{ pF}$ $C_{ca}=126 \text{ pF}$	99.33	45.07	6.45	3.1
$C_{ab}=126 \text{ pF}$ $C_{bc}=126 \text{ pF}$ $C_{ca}=86.2 \text{ pF}$	99.2	46.26	A:6.20 B:6.55 C:6.05	A:3.0 B:3.1 C:3.0

开关,母线间电容增加了谐振发生的概率,也大大增加了谐振电压的峰值。这是因为当某一相发生谐振时,高幅值谐振电压通过电容耦合到其它两相,使得这两相发生谐振的可能性增大。

母线间电容的关系为 $C_{ab}=C_{bc}>C_{ca}$,为了方便,往往取 $C_{ab}=C_{bc}=C_{ca}$ 。两者相比,谐振发生的概率几无变化,虽然谐振电压值略有区别,但工程上完全可以接受。

4 结论

通过EMTP模拟分析了中性点接地系统变电站母线间电容对铁磁谐振的影响,结果表明,该电容大大增加了工频铁磁谐振的概率和谐振电压值,因此母线间电容不应轻易忽略。如取母线间三个电容值相等,虽与实际情况有所差异,但在工程可接受范围。

参考文献:

- [1] C Kieny. Application of the Bifurcation Theory in Studying and Understanding the Global Behavior of a Ferroresonant Electric Power Circuit[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1991, 6(2): 866-872.
- [2] A E A Arujo, A C Soudack. Ferroresonance in Power Systems: Chaotic Behaviour[J]. IEE Proc.-c, 1993, 140(3): 237-240.
- [3] S Mozaffari, M Sameti. Effect of Initial Conditions on Chaotic Ferroresonance in Power Transformers[J]. IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., 1997, 144(5): 456-460.

作者简介:李云阁(1967-),男,博士研究生,主要从事电力系统暂态分析和现场试验。

简讯

长江可开发水电资源相当于10座三峡电站装机容量

长江水利委员会刚刚完成的“长江流域水力资源复查”结果显示,在我国当前技术水平条件下,长江流域可开发利用的水电资源装机容量为2 562 729 MW,相当于10座三峡电站的装机容量。

20世纪80年代以来,长江流域水电建设取得了巨大成就。20年间,全流域水电站数量增加了2倍多,由762座增至2 441座;装机容量增长了4倍以上,达到697 271 MW;年发电量翻了两番。

但据长江委长江勘测规划设计研究院的消息称:长江水资源的开发利用程度仍然较低,全流域目前已(在)建电站装机容量仅占可开发量的27.2%。换句话说,就是只利用了约1/4的长江水力资源。

随着我国水电建设水平的不断提高,20世纪中期许多制约长江大型水电站建设的难关已经被攻克。在今后几十年内,国家在继续开发长江中游水力资源和在下游修建抽水蓄能电站外,将进一步加大长江上游干(支)流水力资源的开发,加快上游大型水电站建设。