

电力系统无功功率与有功功率控制

# 电力系统无功功率 与有功功率控制

何利铨 邱国跃 编著

重庆大学出版社

TM761

社

## 内 容 提 要

本书着重介绍电力系统电压和无功功率控制、频率和有功功率控制、原动机——发电机组低频振荡及汽轮发电机组扭转振荡和次同步谐振等方面的概念、物理本质、数学模型及实际应用。

本书用作高等学校“电力系统及其自动化”专业硕士学位研究生和高年级学生选修教材,也可作为从事电力系统工作的工程技术人员的使用书籍。

### 电力系统无功功率与有功功率控制

何利铨 邱国跃 编著

责任编辑 唐 利

\*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆通信学院印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:12.5 字数:312千

1995年4月第1版 1995年4月第1次印刷

印数:3500

ISBN 7-5624-0985-4 /TM·42 定价:9.80元

## 前 言

这是为“电力系统及其自动化”专业而编写的教材,也适用于该专业硕士学位研究生。对于从事电力系统工作的工程技术人员也有使用价值。

为了适应我国电力工业的发展,培养能够适应现代电力工业水平的学生和人材,需要一本能够包括现代电力系统电压和无功功率控制方面具有先进水平的理论和实践总结,包括现代电力系统频率和有功功率控制方面的理论和实际应用,并且包括现代电力系统新的动态问题——低频振荡和扭转振荡及次同步谐振 SSR 的教材及使用书籍。这是编写本书的原因。把电力系统电压和无功功率控制及电力系统频率和有功功率控制两方面内容合写在篇幅有限的一本教材里,而且把现代电力系统中新的动态问题——低频振荡和扭转振荡及次同步谐振 SSR 归属于电力系统的有功功率控制范畴,更是大胆的尝试。

本书的素材部份地来自作者在国外从事访问学者工作和学习时所收集的资料,把它介绍给读者。

为了配合本书的教学和使用,作者开发编制和使用低频振荡及次同步谐振 SSR 时域计算机仿真程序于教学实验和实际电力系统研究分析中。但由于篇幅有限,未编入本书。

贵州工学院胡国根教授对本书初稿作了审阅并提出了宝贵意见,在此表示感谢。

何利铨 邱国跃

1992年10月25日

# 目 录

第一章 引论	(1)
第一节 电力工业的历史	(1)
第二节 现代电力系统基本特性	(2)
第三节 有功功率和无功功率的概念	(4)
1.3.1 单相电路	(4)
1.3.2 三相电路	(5)
1.3.3 无功功率 $Q$ 的符号	(6)
1.3.4 复数功率	(6)
1.3.5 无功功率的新定义	(6)
1.3.6 关于无功功率的几点解释	(10)
第四节 电源间的功率传输	(10)
1.4.1 影响有功和无功功率潮流的因素	(10)
1.4.2 关于有功及无功功率潮流的基本观点	(11)
第五节 确定供电质量的因素	(11)
第二章 电压和无功功率控制	(13)
第一节 对电压和无功功率控制的要求	(13)
第二节 电力系统各元件的无功功率特性	(13)
2.2.1 输电线	(13)
2.2.2 变压器	(18)
2.2.3 负载	(18)
2.2.4 发电机组	(19)
第三节 电力输电线的特性	(23)
2.3.1 对电力输电线的要求	(23)
2.3.2 典型参数	(24)
2.3.3 无损失输电线方程	(24)
2.3.4 空载下无损输电线电压、电流分布	(25)
2.3.5 负载时无损输电线电压、电流分布	(27)
2.3.6 功率传输和稳定性因素	(29)
2.3.7 输电线的热限制	(33)
2.3.8 输电线负荷能力特性	(34)
第四节 有补偿的输电线	(37)
2.4.1 补偿理论	(37)
2.4.2 并联电抗器和电容器	(41)
2.4.3 串联电容器	(42)
2.4.3.1 串联电容器在配电线路上的应用	(43)

2.4.3.2	应用于甚高压输电线	(44)
2.4.3.3	中点串联电容器补偿分析	(46)
2.4.4	可调节动态并联补偿	(47)
2.4.4.1	中点可调节补偿器分析	(47)
2.4.5	静态 VAR 补偿器	(49)
2.4.5.1	定义	(49)
2.4.5.2	SVC 的类型	(50)
2.4.5.3	理想 SVC 基频性能	(50)
2.4.5.4	SVC 关键元件工作原理	(52)
2.4.5.4.1	可调电纳原理	(52)
2.4.5.4.2	可控硅控制电抗补偿器(TCR)	(54)
2.4.5.4.3	可控硅投切电容补偿器(TSC)	(56)
2.4.5.4.4	机械投切电容器(MSC)	(58)
2.4.5.4.5	SVC 在电力系统中的新应用	(58)
2.4.6	并联补偿特性对重负荷 EHV 输电线性能的影响	(60)
2.4.7	并联补偿和串联补偿的比较	(63)
2.4.8	同步调相机	(66)
<b>第五节 电压控制</b>		(68)
2.5.1	可变分接头变压器	(68)
2.5.2	大容量输电系统设计标准	(68)
2.5.3	负荷潮流分析	(69)
2.5.3.1	负荷潮流的类型	(70)
2.5.3.2	LF 分析法	(71)
2.5.3.3	附录	(77)
2.5.4	电压不稳定性和电压崩溃	(79)
2.5.4.1	有关电压不稳定的基本概念	(80)
2.5.4.2	电压崩溃现象	(87)
2.5.4.3	电压不稳定和电压崩溃的预防	(87)
2.5.4.4	某系统电压崩溃的防护方案	(88)
2.5.4.5	分析方法	(89)
<b>第三章 频率和有功功率控制</b>		(92)
<b>第一节 电力系统</b>		(92)
3.1.1	单台发电机组	(92)
3.1.2	互联发电机组	(96)
3.1.3	附录	(99)
<b>第二节 原动机和能量供应系统</b>		(100)
3.2.1	汽轮机	(100)
3.2.1.1	汽轮机的构成	(100)
3.2.1.2	汽轮机模型	(101)
3.2.2	水轮机	(102)

第三节	一次速度/负荷控制 .....	(103)
3.3.1	调速系统 .....	(103)
3.3.1.1	同步调速器 .....	(103)
3.3.1.2	具有速度下倾特性的调速器 .....	(104)
3.3.1.3	用调差特性作一次速度/负荷控制的要求 .....	(105)
3.3.1.4	具有瞬态调差补偿的调速器 .....	(106)
3.3.1.5	调速器特性小结 .....	(107)
3.3.2	单区域一次速度控制特性 .....	(107)
3.3.2.1	调速器的静态速度/负荷特性 .....	(108)
3.3.2.2	合成调整特性 .....	(109)
第四节	辅助控制(二次控制) .....	(112)
3.4.1	单机运行电力系统的辅助控制(二次控制) .....	(112)
3.4.2	互联系系统的辅助控制(二次控制) .....	(112)
3.4.2.1	只有一次速度控制时的特性 .....	(112)
3.4.2.2	联络线偏差负荷频率控制 .....	(114)
3.4.3	调速器死区对速度调整的影响 .....	(121)
3.4.4	综合自动发电控制(AGC)作用 .....	(121)
3.4.5	AGC 的实施 .....	(121)
第五节	对水轮机特性和调速控制的要求 .....	(124)
3.5.1	水轮机/压力水管传递函数 .....	(124)
第六节	对汽轮机及其调速器要求 .....	(134)
3.6.1	汽轮机模型 .....	(135)
3.6.2	汽轮机的速度控制系统 .....	(136)
3.6.2.1	机械液压调速器(MHG) .....	(136)
3.6.2.2	电气液压调速器(EHG) .....	(137)
3.6.3	汽轮机调速系统模型 .....	(138)
3.6.4	超速限制控制 .....	(138)
3.6.5	汽轮发电机组超出频率性能 .....	(142)
第七节	低频减载 .....	(144)
第四章	原动机发电机组低频振荡 .....	(146)
第一节	研究低频振荡的电力系统模型 .....	(146)
4.1.1	研究低频振荡的典型电力系统接线 .....	(146)
4.1.2	研究低频振荡用同步发电机组传递函数 .....	(146)
4.1.3	初始电流、电压和初始转子相位角的计算 .....	(148)
4.1.4	同步发电机组对无穷大系统的低频振荡特性 .....	(149)
4.1.4.1	同步发电机组固有机机械振荡特性 .....	(149)
4.1.4.2	励磁系统对同步发电机低频振荡特性的影响 .....	(150)
4.1.4.3	远距离输电低频振荡特性 .....	(152)
4.1.5	消除电力系统低频振荡的途径和实现 .....	(153)
4.1.5.1	消除电力系统低频振荡的途径 .....	(153)

4.1.5.2	同步发电机组的附加励磁控制(电力系统稳定器——PSS)	(153)
4.1.5.3	励磁系统带励磁稳定器及 PSS 的一机对无穷大母线系统联合模型	(155)
4.1.5.4	同步发电机组的附加调速器控制	(158)
第二节	研究低频振荡的方法	(159)
第五章	汽轮发电机组扭转振荡	(160)
第一节	汽轮机发电机组的扭转特性	(160)
5.1.1	基本定义	(160)
5.1.2	汽轮发电机组扭转振荡模型	(161)
5.1.3	扭转振荡自然频率和扭转振荡模式状态	(164)
5.1.3.1	扭转振荡自然频率的概念	(164)
5.1.3.2	模式状态的概念	(165)
5.1.3.3	扭转特性举例	(165)
5.1.4	原动机发电机组的轴系统统一矩阵形式及 $A$ 特征式	(166)
5.1.5	电力系统对机组轴振荡的影响	(169)
5.1.6	轴系统方程的 p. u. 形式	(170)
5.1.7	机械阻尼分量准确表达	(171)
5.1.8	相同并列机组机械系统数学模型	(172)
第二节	与扭转振荡有关的特殊问题	(174)
5.2.1	电网投切对汽轮发电机组的干扰	(174)
5.2.2	次同步谐振(SSR)	(176)
5.2.2.1	串联电容器补偿输电系统的特性	(177)
5.2.2.2	SSR 的产生	(178)
5.2.2.3	分析 SSR 的数学模型	(179)
5.2.2.4	SSR 特征值分析及实例	(185)
5.2.2.5	SSR 时域计算机分析	(188)
5.2.2.6	消除 SSR 的措施	(188)



# 第一章 引 论

## 第一节 电力工业的历史

1831年,法拉第发现了电磁感应定律,为电机的发展奠定了基础

$$e = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1-1)$$

式中, $\psi$  = 磁链 = 匝数  $\times$  磁通。

如果磁通是时间  $t$  和距离  $x$  的函数,那么

$$d\psi = \frac{\partial\psi}{\partial t} dt + \frac{\partial\psi}{\partial x} dx$$

于是

$$e = - \frac{\partial\psi}{\partial t} - \frac{\partial\psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \\ = e_1 + e_2 \quad (1-2)$$

$e_1$ ——由于磁通随时间变化感应的电势;

$e_2$ ——由于运动切割磁场而感应的电势。

式(1-2)为制造各种不同的电机奠定了基础

对变压器:  $e_2 = 0$   $e = e_1$

对直流电机:  $e_1 = 0$   $e = e_2$

对同步电机:  $e_1 = 0$   $e = e_2$

对感应电机:  $e = e_1 + e_2$

最早的交流和直流发电机于1832年由 Pixii 造成,他是安培的一位技工。电机用于实验室。电机采用的永久磁铁磁场强度很弱却很重。

1865年,由于小型的永磁直流发电机供电的电磁铁得到广泛应用。于1866年,Wheatstone、Siemens 和其它人研制成自激发电机,因此开始使用电磁铁的剩磁自启动。

19世纪70年代,开始了商业性地使用电,汞弧灯用于城市照明。当时是一只灯配一台发电机。

1899年,Edison 制成了白炽灯,并且经过他不断地改进之后,实现了电的商业化。

第一个完整的电力系统(由发电机、输电线、熔断器、电表和负载等构成)于1882年由 Edison 建成。这就是世界历史上纽约的 Pearl Street 系统。这个系统是直流、三线、220/110V,发电机是双极直流发电机,由蒸汽机带动。它对一个约一平方英里的地区共59个用户通过地下电缆供电。负荷全是 Edison 的白炽灯。很快,在世界上出现了若干个这样的系统。由于 Sprague 于1884年研制成功专用于 Edison 系统的马达,系统增添了电动机负荷。这是世界上最初发展的最大的电力工业。

尽管直流电最先得到广泛的发展,交流电后来还是完全地超越了它。到1886年,Edison 公司的发展依然被限制住,因为它仍然只能在短距离内由发电站供电。为了使输电功率损失 ( $I^2R$ ) 和电压损耗限制在容许的范围内,长距离输电必须提高电压水平。直流电难以实现电压变换,直流电机的换向问题也限制了直流发电机的电压。Stanley 解决了这个问题,于1885年制成了变压器并使之商业化。



19世纪90年代产生了一场关于用电工业应该以直流还是交流为标准的争论,十分激烈。实际上,这是 Thomas Edison 和 George Westinghouse 之间的竞争。Edison 提倡直流而 George 则推崇交流。由于下列原因,到了下一世纪,交流系统获得了胜利:交流变压器容易变换电压及电流水平,这样就为发电、输送和配电提供了很大的灵活性;交流发电机比直流发电机简单得多;交流电动机也比直流电动机简单,且便宜得多。

交流系统的成功也很大程度上由于 Nikola Tesla,他是多相交流系统的发明者。他曾为 Edison 工作过,到 1888 年,他在交流电动机、发电机、变压器和输电系统等方面拥有多项专利。Westinghouse 购买了这些专利并形成了今日交流系统的基础,并且至今也没有发生根本的改变。

直流系统的支持者争辩说交流系统高电压是危险的。直至 1893 年,当 Tesla 把交流电系统成功地用于芝加哥的世界博览会时,交流对直流之间的争论才算结束。

交流系统后来又被选用于 Niagara 电站,因为直流电不能用于把电能输送到 20km 以外的 Buffalo 城。Niagara 电站的设计和建造,为交流电确立了最后的胜利。

在交流电应用早期,频率没有标准化。各种频率,例如 25、50、60、125 和 133Hz 都在使用。这就产生了相互连接的问题,最后 60Hz 被确定为北美地区的标准频率。

由于传输功率不断增大,这就要求传输电压越来越高。早期交流系统使用 12kV、44kV 和 60kV。1913 年增高到 150kV;1922 年高到 165kV;1923 年到 220kV;1935 年到 287kV;1955 年到 330kV,而 1965 年已高达 550kV。1966 年加拿大已使用了第一条 735kV 输电线,1969 年美国使用了 765kV 输电线。为了避免电压无限制地提高,电力工业制定了某些标准电压等级。高压标准等级规定为 115kV、138kV、161kV 和 230kV;而超高压标准等级为 345kV、500kV 及 765kV。

随着 20 世纪 50 年代初汞弧管的发展,在下列的特殊情况下,直流输电系统则是经济的:

- 用架空线远距离(大于 640km)输送大功率电能;
- 距离超过 30km 的水下电缆;
- 用于两个系统之间的异步连接,这时用交流输电线是不实际的。

随着可控硅转换器的出现,使直流输电具有巨大的吸引力。由于这种转换设备成本的不断降低和可靠性的不断提高,高压直流输电的应用已稳步地增长。

## 第二节 现代电力系统基本特性

- \* 宁用 AC 而不用 DC
- \* 交流用正弦波
- \* 三相系统
- \* 60 或 50Hz
- \* 同步系统

为什么用 50/60Hz?

- \* 过低的频率不能用于照明,因为眼睛会觉察出闪烁。
- \* 高频的优点:
  - 设备的功率/重量比提高,材料使用率较好;
  - 某些电动机于 3600r/min 比较低转速下有更高的效率。

- \* 高频的缺点：
  - 铁损较高；
  - 感抗值较大；
  - 输电线间的容抗较小；
  - 长输电线会产生谐振；
  - 产生较强的幅射，电话系统受干扰。
- \* 实际使用中，50—60Hz 较为满意。
- \* 某些系统中，如飞机上，使用 400~1000Hz。

为什么应用正弦波？

- \* 正弦波的单一性：
  - 正弦的导数仍是正弦；
  - 正弦相加仍是正弦。
- \* 上述特性反应在交流系统中为：
  - $v = L \frac{di}{dt}, i = C \frac{dv}{dt}$ ；
  - 因此，变压器的输入是正弦时，输出亦是正弦；
  - 流入母线的电流总和为正弦电流。

注：频率要保持不变。

- \* 一个非正弦波可分解成正弦基波和其它正弦谐波，谐波将引起：
  - 较高的铁损，引起电机发热；
  - 输电线中产生容性电流损失，因为频率较高时  $x_c$  较小；
  - 用于提高线路功率因素的电容器容抗降低因而产生过热；
  - 电话线受干扰。

为什么用三相？

- \* 多相设备有利于原材料有效利用：
  - 设备的功率/重量比较高；
  - 当相数超过 3 时，上述比值提高不大。
- \* 多相系统可产生旋转磁场，是交流电机的基础。
- \* 三相瞬时功率之和是常数，因此产生不变力矩（静态力矩见 1.4.2）。
- \* 最近，人们已注意到 6 相或 12 相输电，因为：
  - 可提高热负荷容量；
  - 降低相电压。

为什么用同步系统？

- \* 同步电机用作发电机：
  - 它有与系统无关的励磁系统；
  - 其励磁系统可有效地控制电压。
- \* 转子（磁场）速度与定子绕组（电枢）产生的旋转磁场同步。
- \* 当多于一台同步机同时工作时，他们必需同步运行。

### 第三节 有功功率和无功功率的概念

#### 1.3.1 单相电路

假设图 1-1 单相电路,其中

$$e = E_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

电路的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= ei = E_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) \\ &= (E_m I_m / 2) [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] \\ &= EI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] \quad (1-3) \\ &= EI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - EI \sin \varphi \sin 2\omega t \\ &= P(1 - \cos 2\omega t) - Q \sin 2\omega t \end{aligned}$$

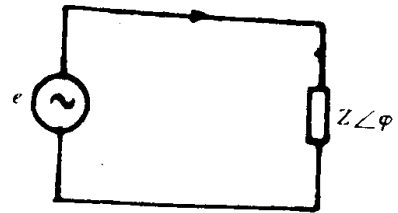


图 1-1 单相电路

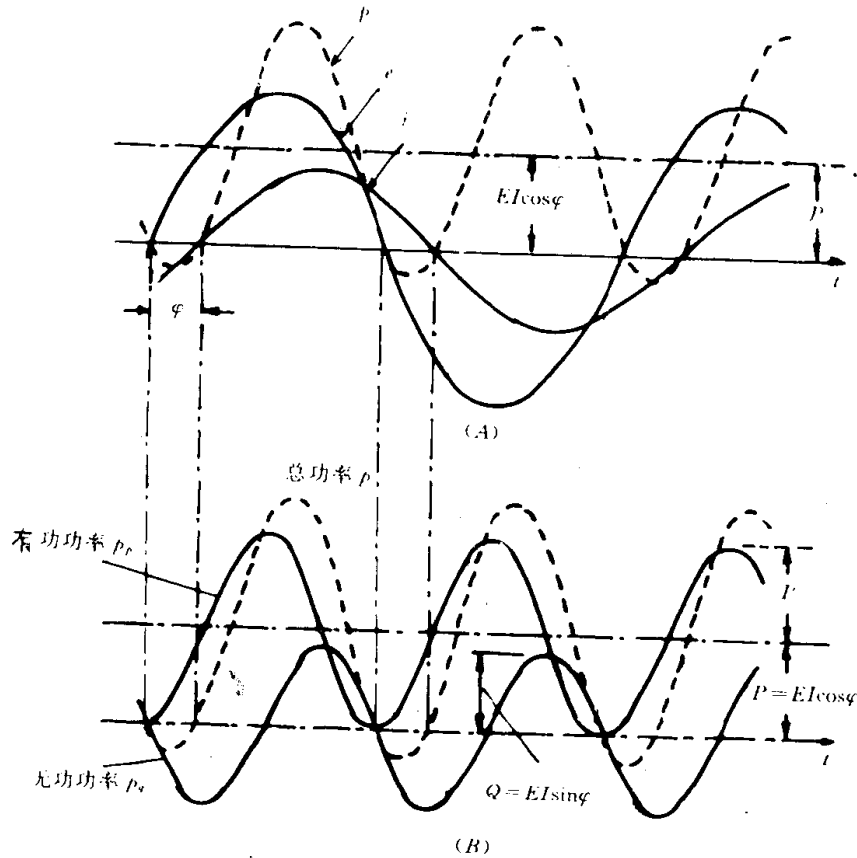


图 1-2  $e, i, p, p_p$  和  $p_q$  曲线

$$p = p_p + p_q$$

图 1-2 表示  $e, i, p, p_p$  和  $p_q$  的图形。

- \*  $p_p$  代表了  $p$  的有功分量,它用于不可逆的消耗,它具有平均值  $P$ 。
- \*  $p_q$  用于建立磁场或静电场,它储存于电感或电容里,并往返于电源和电感、电容之间。它的平均值为零。

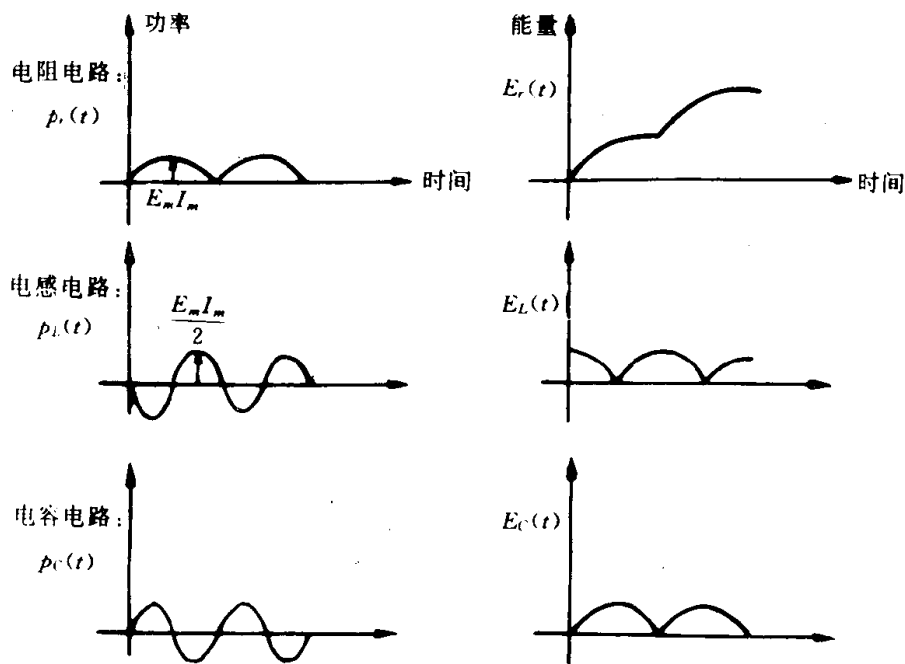


图 1-3 与电阻电路、电感电路及电容电路对应的瞬时功率及能量比较

- \* 一般用  $P$  和  $Q$  表示有功和无功功率,且

$$\begin{aligned}
 P &= p_p \text{ 的平均值} = \text{有用的功率} \\
 &= EI \cos \varphi
 \end{aligned}
 \tag{1-4}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= p_q \text{ 的峰值} \\
 &= EI \sin \varphi
 \end{aligned}
 \tag{1-5}$$

图 1-3 表示了与电阻电路、电感电路和电容电路相应的瞬时功率及能量图形。

### 1.3.2 三相电路

在平衡条件下,且

$$\begin{aligned}
 e_a &= E_m \sin \omega t \\
 i_a &= I_m \sin(\omega t - \varphi)
 \end{aligned}$$

则三相瞬时功率为

$$\begin{aligned}
 p &= e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \\
 &= E_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t - \varphi) \\
 &\quad + E_m \sin(\omega t - 120^\circ) I_m \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) \\
 &\quad + E_m \sin(\omega t - 240^\circ) I_m \sin(\omega t - 240^\circ - \varphi) \\
 &= 3EI \cos \varphi = 3 \times \text{每相平均有功功率}
 \end{aligned}$$

可知:

- \* 三相瞬时功率总和是常数。
- \* 三相瞬时无功功率总和为零,然而在三相系统中,三相无功功率的瞬时值并不重要,因为:

- 把三相瞬时无功功率相加是不合适的;
- 每一相中的无功功率是重要的;
- 和三相电流为零的情况相似。

\* 一般地,三相无功功率用三倍的单相无功功率  $Q$  表示,  $Q$  是每相无功功率的峰值,由式(1-5)表示。

### 1.3.3 无功功率 $Q$ 的符号

- \* 按习惯  $Q$  的符号为:
- 感性负载  $Q$  为正;
- 容性负载  $Q$  为负。

换句话说:

- 感性负载吸收无功功率;
- 容性负载供给无功功率。
- \* 一台同步电机,当:
- 过激磁时供应无功功率;
- 欠激磁时吸收无功功率。

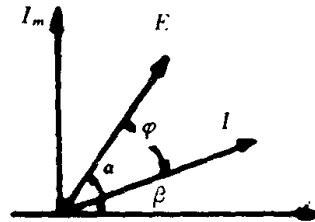


图 1-4 相量图

### 1.3.4 复数功率

- \* 复数功率如图 1-4 所示,  $S$  定义为

$$\begin{aligned}
 S &= \overline{EI^*} = E \angle \alpha (I \angle \beta)^* \\
 &= EI(\alpha - \beta) \\
 &= EI \cos(\alpha - \beta) + jEI \sin(\alpha - \beta) \\
 &= EI \cos \varphi + jEI \sin \varphi \\
 &= P + jQ
 \end{aligned} \tag{1-6}$$

- \* 在复数相乘中用电流的共轭复数的原因是为了符合习惯上  $Q$  的符号规定。
- \*  $S$  的模为

$$|S| = |E||I| = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$|S|$  通常用来规定设备的额定值。

### 1.3.5 无功功率的新定义

如前面所述,正弦电流中的无功功率定义为

$$Q \triangleq UI \sin \varphi$$

习惯上认为它是由电路中的储能元件(电容或电感)引起。在交流电一周期的一部份时间内,储能元件从电源吸收能量,另一部时间内将能量返回电源,理想的无损失储能元件在整个周期平均功率是零。也就是说在外电路和电感或电容之间虽有能量的来回交换,但在储能元件上并没有能量的消耗。无功功率与储能元件相关联。

半导体技术的发展与广泛应用,在电力网引起了日益增多的电流畸变。传统的无功功率概

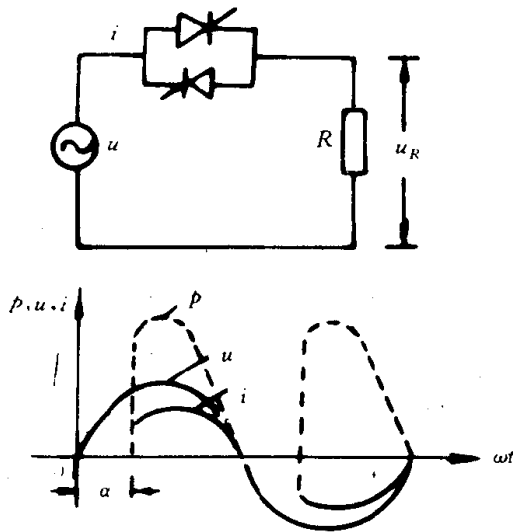


图 1-5 晶闸管控制电路和电压、电流、功率波形

式中  $V_R$  是电阻两端电压的有效值；

$I$  是回路电流有效值；

$V$  是电源正弦电压有效值。

且

$$V_R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = V \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

于是

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-7)$$

由此式可知,虽然负荷为纯电阻,但  $\alpha$  越大,电流畸变越大,  $\cos \alpha$  越小。这个结果与正弦电路中纯电阻负荷功率因数等于 1 的结论是完全违背的。在此电路中,不是由于负荷中的储能元件,而是由于电流畸变而发生功率因数小于 1 的现象。进一步看,在  $0 \sim \alpha$  角范围内,瞬时功率为 0,即电源停止传输功率。在一个周期内有  $p \geq 0$ ,因此电路中不存在负载向电源反送功率,只存在电源向负载传输功率,即不出现电源—负载间的能量交换。

由于此电路中电源的视在功率  $VI$  大于负载的平均功率  $V_R I$ ,我们即知电源在产生负载功率  $V_R I$  时电源不得不提供了一部份为产生负载功率所不需要的电流。换句话说,在此电路中,由于对晶闸管的控制作用,电路除了消耗平均功率之外,还吃掉一部份“无用”功率。

因此,电路中的电压或电流为非正弦波时,已不能用负载的性质来定义是否消耗无功功率或吸收无功功率,需要赋予无功功率的新的、严密的定义。

首先选择一个认为普遍合理的有功电流,定义如下:

\* 定义:有功电流  $i_r$  是与电压  $u$  共同作用,释放功率成为负载实际功率(平均功率)  $P_L$  的各种电流波形中携带能量最小的那种波形。

要推导有功电流的表达式,首先考虑信号的传输伴随着能量的流动。任何信号,如电压信号,电流信号,本身都携带能量。信号能量是决定信号通过负载系统时的功率行为的重要参数。信号能量代表信号的作功能力:没有能量固然不能作功,有能量也不一定作功。要讨论的电流信号,只有在电压信号  $u$  存在时才能做功。它们的瞬时电功率有时不能全部或全部不能转化为平均功率即负载实际功率  $P_L$ 。

念难以圆满解释当电流、电压发生畸变条件下的无功功率现象。可用一个简单但典型的实例说明,这就是图 1-5 表示的晶闸管控制电路。图中,负载是纯电阻的,但是触发角  $\alpha$  的存在,当电源电压波形为正弦时,流经电阻的电流波形发生了畸变。

对此电路,我们可计算它的功率因数

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{V_R I}{VI} = \frac{\text{电阻的平均功率}}{\text{电源的视在功率}}$$

根据信号理论,信号  $i(t)$  携带的总能量  $E_x$  为

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |i(t)|^2 dt \quad (1-8)$$

而平均电功率的表达式为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt$$

由 Schwarty 积分不等式知

$$\left[ \frac{1}{T} \int_0^T v i dt \right]^2 \leq \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \quad (1-9)$$

即

$$P^2 \leq \bar{E}_v \cdot \bar{E}_i \quad (1-10)$$

式中,  $\bar{E}_v = \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt$ ,  $\bar{E}_i = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt$ 。

可见,  $v, i$  的能量只有在最佳条件下才能全部转化为平均功率。要注意, 能量与平均功率在数量上既有联系, 又有区别, 不可混淆。

根据以上有功电流的定义,  $i_p$  应满足的条件为

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T v i dt = P_L \\ \bar{E} &= \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \bar{E}_{\min} \end{aligned} \quad (1-11)$$

这是解泛函的问题。即在  $v$  为已知函数的情况下, 可找出使式(1-11)取极小值的  $i$  极值曲线。解泛函极值得

$$i_{opt} = (P_L / \bar{E}_v) v = (P_L / V^2) v \quad (1-12)$$

取  $i_p = i_{opt}$  时

$$P_L^2 = \bar{E}_v \cdot \bar{E}_i \quad (1-13)$$

由此可明显得出结论: 已知电源电压  $v$  (正弦的或非正弦周期函数) 作用时, 若要求电源输出规定平均功率值, 则携带能量最小的电流应与电源电压同频同相、波形亦完全相同。这电流就是有功电流  $i_p$ 。此电流是产生负载实际功率 (平均功率)  $P_L$  时毫无多余部份的电流。

由上述有功电流  $i_p$  的定义, 可得无功电流  $i_q$  的定义为: 无功电流是总电流  $i$  中携带能量为产生负载功率  $P_L$  所不必要的那部分分量。因为它携带的能量对产生  $P_L$  没有贡献, 所以称为无功电流  $i_q$ 。  $i_q$  的表达式为

$$i_q = i - i_p$$

相应地  $i_q$  携带的能量  $\bar{E}_q$  为

$$\bar{E}_q = \frac{1}{T} \int_0^T i_q^2 dt$$

可称为无功能量。无功能量同样不一定能全部转化为无功功率。似前面讨论有功电流时,  $i_p$  与  $v$  共同作用时在最佳条件下能释放的最大瞬时功率, 用  $Q_{\max}$  表示为

$$Q_{\max} = V I_q \quad (1-14)$$

就称为无功功率, 又称广义无功功率  $Q$ , 即

$$Q = V I_q$$

式中



$$I_q = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T i_q^2 dt \right]^{1/2}$$

即  $i_q$  的有效值。而  $V$  是电源电压  $v$  的有效值。

由  $i = i_p + i_q$ , 利用  $i_p$  和  $i_q$  的正交性, 可写出  $I^2 = I_p^2 + I_q^2$ , 均为有效值。又可写出

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad S = VI, \quad P = VI_p, \quad Q = VI_q$$

式中  $Q$  即是已定义的广义无功功率。有功功率  $P$  和视在功率  $S$  在广义情况下也可称为广义的。此式在形式上与正弦电路中是一样的。

下面可根据新的有功电流和无功电流定义引出无功功率补偿的新概念。运用这个概念才能进一步理解电力系统中补偿器的作用和原理。如图 1-6 所示。

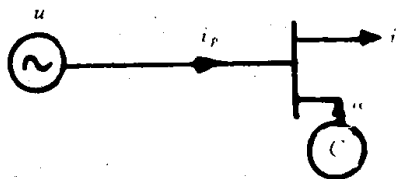


图 1-6 系统补偿原理图

设负载实际吸收的电流为  $i$ , 为了使输电线上流过纯有功电流  $i_p$ , 则需要负载端接入一个补偿器, 补偿器提供的电流为  $i_c$ , 则

$$i = i_p + i_c$$

这里的  $i_c$  就是无功电流  $i_q$ , 这就是电力系统中进行无功补偿的要点。这是完全的补偿, 线路上的电流  $i_p$  是为产生负载实际功率(平均功率)携带能量最小的电流, 因而在电路上造成的损失是最小的。如上所述,  $i_p$  的波形与  $v$  相同。

又用图 1-5 表示的晶闸管控制电路作例子来讨论电路的补偿。  $v$  是正弦的,  $i$  是畸变的波形, 则  $i_c$  的波形在完全补偿时应如图 1-7 表示。

图 1-7 中用阴影表示的就是  $i_c$ , 亦即电路补偿前的无功电流  $i_q$ 。  $i_p = i - i_c$  是完全补偿后线路上的电流, 现在  $i_p$  也是正弦的且与电源电压波形  $v$  同相, 这是最佳补偿下的最佳输电电流。经最佳补偿后的线路功率因数为 1。

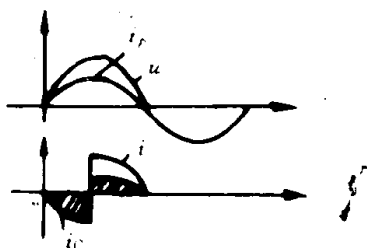


图 1-7 完全补偿波形图

在无波形畸变的电路中, 即具有储能元件的正弦电路中, 用广义无功功率或无功电流来解释电路的无功补偿时与传统的概念是完全一致的。在完全补偿时, 无功补偿器提供的电流就是电路中原有的无功电流  $i_q$ 。完全补偿后线路上的电流与电源电压同相, 是纯有功电流  $i_p$ , 线路的功率因数  $\cos\varphi$  为 1。

对电力系统中由于电流、电压发生畸变的无功功率现象作最佳(完全)补偿是不易做到的, 因此仍广泛地应用谐波分析的理论和技术以消除电力系统中存在的高次谐波, 这方面的投资仍然是巨大的。

上面,我们用一个最简单但又典型的晶闸管控制电路说明了由于电流(或电压)畸变引起的无功功率现象,并引出了广义无功电流、无功功率的定义,还引出了电力系统中进行完全最佳无功补偿的概念,希望能对读者进一步理解系统中进行补偿的物理本质有所帮助。

电力系统中类似的无功功率现象还可举出,例如:

- \* 直流输电的两侧换流器要“吃掉”大量的无功功率,强制换相技术能减小换流器的无功消耗,甚至可以使换流器发生无功功率。

- \* 一种新型的可控硅无功电源可以发出感性无功,又可以发出容性无功功率。

### 1.3.6 关于无功功率的几点解释

- \* 虽然无功功率说明了一个元件的平均功率为零,但它代表了在电感或电容中储存及释放磁场能量或电场能量所需要的真实的功率,每周期两次。

- \* 电网中,在电源、电感元件和电容元件之间发生能量的交换。与无功功率相关的能量是储存的电感性及电容性能量之和。

- \* 电力系统中某些点之间由于无功功率不断来回的交换引起发电和输电设备上的电压降和损失。

由于电力系统效率及电压调整十分重要,因此无功功率在电力系统的传输是头等重要的。

- \* 在系统的任何节点上: $\Sigma P=0, \Sigma Q=0$ 。有功功率或无功功率可以算术相加。

- \* 对一个系统:

——可作出有功功率和无功功率平衡图表;

——注入  $P$  和  $Q$  的总和等于流出  $P$  和  $Q$  的总和加上损失的  $P$  和  $Q(I^2R$  和  $I^2X)$ 。

- \* 在静态情况下:

在电网中  $P$  和  $Q$  是彼此完全独立的,并且受不同控制作用的影响(见 1.4)。

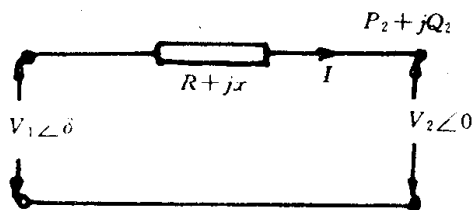


图 1-8 输电线路图

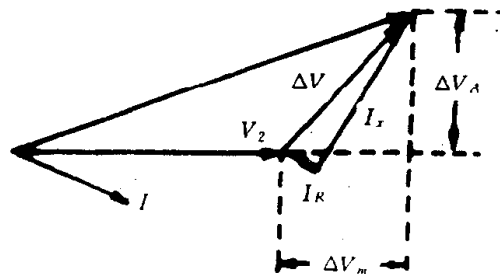


图 1-9 输电线路矢量图

## 第四节 电源间的功率传输

### 1.4.1 影响有功和无功功率潮流的因素

如图 1-8 输电线路中,矢量图如图 1-9 所示。

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= \bar{V}_2 + (R + jX)I \\ \Delta \bar{V} &= \bar{V}_1 - \bar{V}_2 = (R + jX)I \\ &= (R + jX)(P_2 - jQ_2)/\bar{V}_2 \\ &= \Delta V_m + j\Delta V_A \end{aligned}$$