

电网

无功控制与无功补偿

张利生 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网 无功控制与无功补偿

张利生 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

作者依据现行有关无功补偿和电压管理的规程规范,在吸纳权威专家的经典理论、学术观点以及最新科研成果的基础上,重新梳理了多年来从事电网无功电压运行管理工作的实践经验,几易其稿编写成本书。

本书全面、系统、详尽地阐述了无功控制、无功补偿、电压调整、电压稳定、无功优化、AVC、SVC、FACTS 技术等专业知识,共分七章,主要内容包括无功功率控制、电压调整、电网无功优化、电网自动电压控制系统、电压稳定性、传统的无功补偿装置和柔性输电技术在电网无功控制中的应用。

本书可供从事电网规划、设计、调度、运行及供电生产技术管理工作的技术人员和管理人员使用,也可供相关专业高等院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电网无功控制与无功补偿/张利生编著. —北京:中国电力出版社, 2012. 4

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2856 - 3

I. ①电… II. ①张… III. ①电力系统 - 自动控制 - 研究
②电力系统 - 无功补偿 - 研究 IV. ①TM761 ②TM714. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 056450 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 4 月第一版 2012 年 4 月北京第一次印刷

710 毫米 × 980 毫米 16 开本 12 印张 204 千字

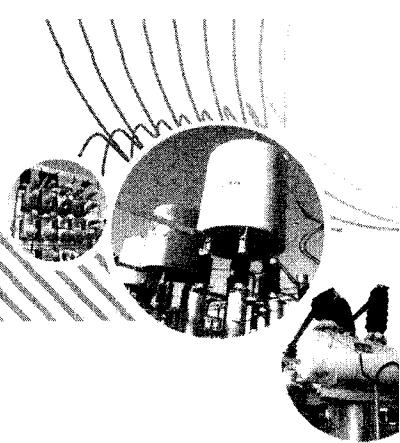
印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言



无功功率是交流同步电网中最重要的因素之一，它与电网的供电能力、电能质量、网络损耗、安全稳定运行水平等密切相关。电网中多数元件需要消耗无功功率，大多数用户的负荷也需要消耗无功功率，这些无功功率必须从网络中的某个地方获得，而无功功率传输又有诸多的限制条件，这就引出了无功平衡与无功补偿的问题。

在电网中完全不传输无功功率实际上是不可能的，除非在同一电网、同一电压等级的节点上无功功率的产生与需要量相等。因此，经常可以见到在同一电网的配电网中使用并联电容器进行容性补偿，而在输电网络中又使用并联电抗器进行感性补偿，以实现无功功率分层、分区就地平衡。

控制无功功率是保证供电质量的基本方法。为保证电网各枢纽点和用户侧电压在一定的范围内变化，需要对这些节点的电压进行适时的控制，而通过增减供给或消耗该节点的无功功率即可实现上述目标。同时通过对输电网络中无功功率的控制，既可以实现输电网络功率损耗最小，又可以实现传输容量最大的目标。另外，从实质上看，交流网络输电中的电压稳定问题及电压崩溃问题还是无功功率控制问题。由于在交流同步电网运行中无功功率控制如此重要，因而无功功率控制与无功功率补偿是本书论述的主题。

解决电网无功功率控制问题有许多方法，如使用同步发电机、同步调相机、并联电容器、并联电抗器、静止无功补偿器（SVC）、静止无功同步补偿器（STATCOM）等都可以实现对无功功率的控制。20世纪70年代末，电力电子技术开始应用于交流输电系统，如晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）等就出现在这一时期，它们单独或与固定并联电容器组合来控制无功功率，这类装置被称为静止无功补偿器（SVC）。而静止无功同步补偿器（STATCOM）则是当前国内外最新、最先进的动态无功补偿装置。

无功优化是电网无功功率控制的理想方式，它是通过合理调节变压器的分接头及投切无功补偿设备，达到保持系统电压水平、促使无功功率合理流动进

而减小系统有功损耗的目标。预定目标综合最佳的优化问题，属于多约束非线性组合优化范畴。近年来，国内外对电网无功优化的研究已非常深入和广泛，已提出的无功优化求解方法有二次规划法、动态规划法、内点法、灵敏度法和单纯形法，这些算法由于多数将离散变量作为连续变量处理，使求解时陷入局部最优且时间过长。目前，利用遗传算法解决非线性优化问题较为成功，但仍然存在收敛速度慢、交叉和变异概率低等问题。而免疫遗传算法已经普遍地应用在无功优化计算中，但存在的问题是有时也陷入局部最优，并且局部搜索能力不强。而使用将变尺度混沌理论与免疫遗传算法相结合的混合智能算法可以很好地解决免疫遗传算法在应用中出现的问题。本书对上述问题进行了较为详细的论述。

随着电网的不断发展，电网结构日趋复杂，无功调节手段数目多，相互影响大。这些因素导致电网电压/无功功率优化控制问题的规模越来越大，传统的电压/无功功率优化控制方法已不能满足电力系统实际运行的需求。有必要在继续增加本地无功资源、提高电压控制能力的同时，建设自动电压控制系统，以完善对电网无功电压分布的综合决策、调度和管理，优化调度现有的无功电压调控资源，提高系统满足电能质量、电网安全和经济运行等要求的能力，减轻运行人员工作量。而自动电压/无功功率控制系统（AVC）是在电网EMS系统基础上，利用电网实时运行数据，从整个系统的角度科学决策出最佳的无功电压调整方案，自动下发各个子站装置，以电压安全和优质为约束，以系统经济性运行为目标，连续闭环地进行电压的实时优化控制，解决了无功电压协调控制方案的在线生成、实时下发、闭环自动控制等一整套分析、决策、控制、实时追踪的问题。AVC能够有效地克服电网无功电压控制中存在的不足，解决电网当前和未来面临的电压控制问题。本书重点介绍了以德国RWE电力公司为代表的两级电压控制系统和以法国EDF电力公司为代表的三级电压控制系统，同时详细介绍了国内由清华大学开发的已在多个省网投运的AVC系统。

电压稳定是电力系统稳定性的一个重要方面。自20世纪70年代后期以来，国际上相继发生多起由于电压失稳引起的大面积停电事故，事故发生时系统功角并未失去同步，但是系统电压大幅度跌落，是一种和功角稳定不同类型的系统稳定问题。本书对电力系统电压稳定性的概念及防止电压崩溃的措施进行了论述。

在交流电的使用过程中，人们发现了功率因数的问题，即 $P = UI\cos\varphi$ ，为

使 $\cos\varphi = 1$ 需要在交流系统中增加并联电容器，称为功率因数校正。而并联电容器是目前国内外使用量最多且应用最为广泛的无功补偿装置，即使目前世界上最先进的无功补偿装置——静止无功补偿器（SVC），其构成也同样离不开并联电容器。本书对并联电容器的发展历史、基本原理、结构及技术参数、电容器单元的类型、高压并联电容器装置的种类、并联电容器的使用和运行试验、谐波对电容器影响、高压并联电容器组的主要配套设备、电容器组故障类型及保护配置等进行了详细的介绍。

随着电力领域新技术的发展，电力系统的无功控制技术得到进一步丰富和提高。利用普通晶闸管相角控制的柔性输电（FACTS）技术，对电网中有功功率、无功功率进行快速、灵活调节的技术已经发展了几十年且已经成熟，国外应用早且较广泛。近些年，国内在 220kV、500kV 和 750kV 交直流输电工程中重点推广应用了串联补偿、可控串联补偿、静止无功补偿和可控电抗等输电新技术，以不断提高我国电网输电能力和安全可靠性能。可以预见今后会有更多电网公司采用静止无功补偿器（SVC）这一技术。而在国外，更有前景的基于可关断模式 GTO 晶闸管的第二代 FACTS 装置也正在快速涌现，今后普通晶闸管与 GTO 晶闸管混合技术将会在电网中得到大量应用。本书对上述内容进行了初步的介绍，以便读者能够了解无功控制与无功补偿的最新技术与发展动态。

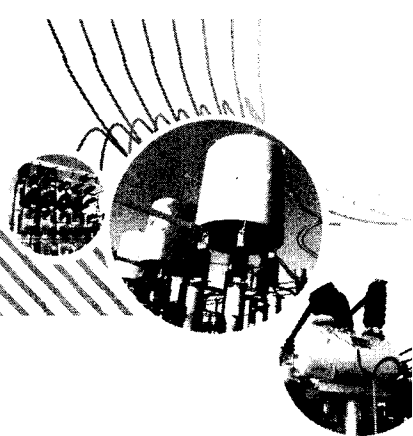
本书整合了当前无功电压方面的经典理论和学术观点；吸纳了国家电网公司、中国电力科学研究院、清华大学对 FACTS 技术在无功电压方面的最新技术报告和应用研究成果；同时紧密结合了国家电网公司最新修订的无功补偿和电压管理的规定、规程、标准，力求尽量做到与电力行业现行的设计及运行要求、规定、标准相一致；比较全面、系统、详尽地给读者展示无功控制、无功补偿、电压调整、电压稳定、无功优化、AVC、SVC、FACTS 技术等专业知识。

由于自身水平有限，书中不当之处在所难免，敬请广大读者指正。

编著者

2012 年 3 月

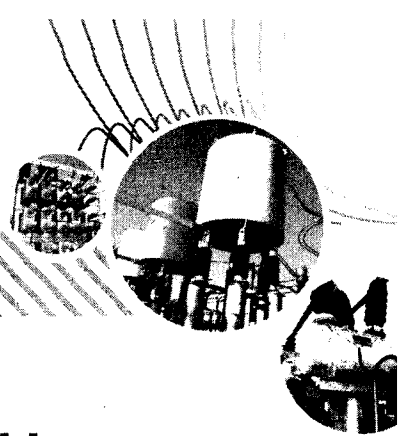
目 录



前言

1	无功功率控制	1
1.1	无功功率基本概念	1
1.2	无功功率与电压的关系	17
1.3	无功功率对线损的影响	18
2	电压调整	20
2.1	电压变动的主要原因及电压调整的必要性	20
2.2	电压管理	21
2.3	电压调整的方法	28
3	电网无功优化	33
3.1	传统无功电压优化数学模型	33
3.2	免疫遗传算法的无功电压优化	34
3.3	变尺度混沌优化方法	35
4	电网自动电压控制系统	42
4.1	电压/无功功率控制概述	43
4.2	变电站电压/无功功率控制的原则和实施要求	46
4.3	自动电压控制系统	49
5	电压稳定性	63
5.1	电压稳定性概念及分类	63
5.2	电压崩溃	65

5.3	电压稳定性分析	67
5.4	提高电压稳定性的措施	69
6	传统的无功补偿装置	71
6.1	并联电容器	71
6.2	高压并联电容器组	104
6.3	高压并联电容器组运行与试验	108
6.4	高压并联电容器组配套设备	123
6.5	并联电容器组保护	139
6.6	同步调相机	152
6.7	并联电抗器	153
6.8	常规串联电容器补偿技术	155
7	柔性输电技术在电网无功控制中的应用	159
7.1	第一代 FACTS 装置——静止无功补偿装置	160
7.2	第二代和第三代 FACTS 装置	167
7.3	可控串联电容器补偿技术	171
7.4	可控并联电抗器	177
	参考文献	184



无功功率控制

对电网无功功率的合理控制是保证电网实现安全稳定、经济运行的基础。为保证电网各枢纽点和用户侧电压在一定的范围内变化，需要对这些节点的电压进行适时的控制。同时通过对输电网络中无功功率的控制，既可以实现输电网络功率损耗最小，又可以实现传输容量最大的目标。另外，交流输电网络中的电压稳定问题及电压崩溃问题从实质上看还是无功功率控制问题。

1.1 无功功率基本概念

1.1.1 无功功率

一、有功功率

有功功率（Active Power）为电气元件在交流电压的作用下消耗的有功功率，是指一个周期内的平均功率，即负荷消耗的功率。

对于纯电阻电路（见图 1-1），设电源电压 $U = U_m \sin \omega t$ ，则回路中的电流、功率分别为

$$I = U/R = (U_m/R) \sin \omega t \quad (1-1)$$

$$P = UI = U_m \sin \omega t \cdot (U_m/R) \sin \omega t \quad (1-2)$$

$$= U_m I_m \sin^2 \omega t$$

$$= UI - VI \cos 2\omega t$$

式中 U 、 I 、 R ——电路中的电压、电流、电阻；

U_m 、 I_m ——电压、电流的最大值。

可以看出，电压和电流相位相同，并且功率始终是一个正值。由于电流和电压同相位，意味着这一功率一直是由电源提供的。

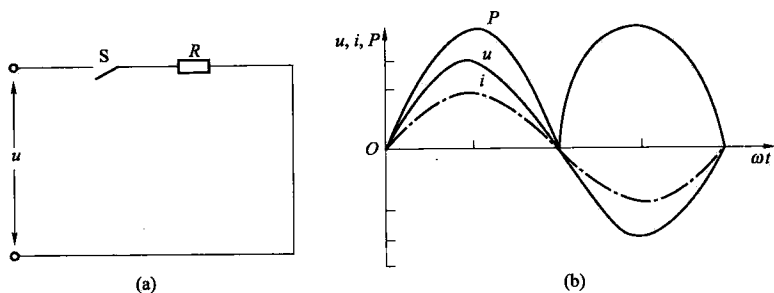


图 1-1 纯电阻电路

(a) 电路图; (b) 波形图

二、无功功率

无功功率 (Reactive Power) 为电压或电动势与无功电流的乘积, 即与维持电压有关, 没有消耗的功率。其物理概念为: 对于一个纯电感 L 电路 (见图 1-2), 当 S 合上后, 流过回路的是一个电感电流, 若回路加的电压为 $U = U_m \sin \omega t$, 则

$$I = I_m \cos \omega t \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} P &= UI = U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t \quad (1-4) \\ &= UI \sin 2\omega t \end{aligned}$$

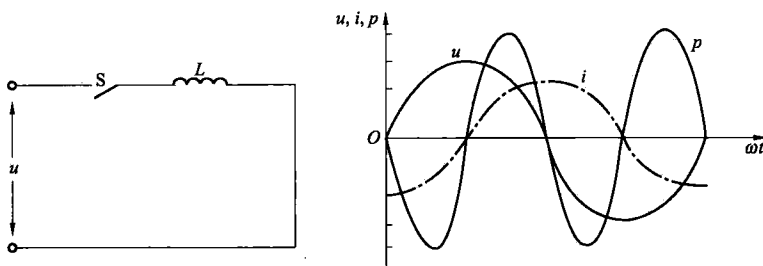


图 1-2 电感回路电路图

由此可见, 电感上的功率是以两倍频率在正负周期内正弦变化的。发电机产生感应 (磁场) 能量, 在电路中以感应 (磁场) 能量的形式蓄积, 在一定的区域里, 电路把能量回送给发电机。在一个周期的时间里, 电能 (功率) 在发电机和电路之间交换两次, 但其平均值为零, 没有消耗。所以对电感而言, 在交流电压作用下, 并不发生有功功率消耗, 只发生电源和电感中磁

场能量之间的交换，并不消耗能量，这种交换功率叫做无功功率。

三、无功功率作用

无功功率并非无用之功，无功功率用来在电路的电感、电容元件中建立变化的电磁场，从而建立电压，传递和转换有功功率，成为电力系统和用电设备（纯电阻设备外）正常运转所不可缺少的重要因素之一。电磁场系统的能量传输速度与光速相同，达 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；导体中自由电子的移动速度与音速相当，是 300 m/s 。从这些事实可以看出，通过导体交换的电力系统的能量，是以频率倍数为周期、在 LC 空间作为无功功率被储存，这个能量像台球弹来弹去似的从电源被传输至负荷，但是在传输过程中是消耗有功功率的。

1.1.2 无功电源

无功功率的供给者包括相位滞后运转的发电机、输电线的对地电容、相位超前的调相设备（并联电容器、进行相位超前运转的同步调相机）、用户的相位超前的感性负荷。

1.1.2.1 动态的无功电源

一、同步发电机

同步发电机（Generator）为电力系统主要的无功电源之一，它既是有功功率电源，又是无功功率电源。不同系统条件和不同安装位置对发电机的运行功率因数要求不同。位于负荷中心附近的发电机组，宜于有较大的送出无功功率的能力，除了可以供应正常负荷的部分无功功率需求外，由于它对系统电压影响大、反应快速，还可以作为电网事故下的紧急无功功率储备。受发电机功率因数的影响，发电机在有功达到额定出力时，无功功率只能达到有功功率的 $50\% \sim 75\%$ 。随着电力系统大机组、远距离、超高压输电比重的逐步增大，发电机无功容量的利用率会进一步降低，因此，电网需相应提高无功补偿度，来保证系统无功功率的平衡。

二、同步调相机

同步调相机（Synchronous Condenser）是一种专门设计的无功功率发电机，确切地说是一种不带机械负载的可以过励磁（经常的运行状态）或欠励磁（较少的运行状态）运行的同步发电机。过励磁状态发出无功功率，欠励磁状态吸收无功功率，通过改变同步调相机的励磁可以平滑地改变其输出的无功功率。同步调相机铭牌容量指过励时发出无功功率的最大值，欠励吸收无功功率为过励的 $0.5 \sim 0.65$ 倍。同步调相机一般装在一些枢纽变电站，虽然它有无功

功率调节特性好等多项优点，但由于建设投资大、运行维护复杂等，不少已退出运行或由无功静止补偿器取代。同步调相机作为无功补偿设备虽早已过时，但为了适应电网稳定及直流输电的需要，还在一些情况下得到使用，主要是装在弱受端系统中，提供受端电压支撑等。

三、同步电动机

同步电动机或同步运行的异步电动机也属于无功电源。同步电动机消耗的无功功率取决于转子中励磁电流的大小。在欠励状态时，定子绕组向电网“吸取”无功功率；在过励状态时，定子绕组向电网“送出”无功功率。因此，只要调节电动机的励磁电流，使其处于过励状态，就可以使同步电动机向电网“送出”无功功率。异步电动机同步运行就是将异步电动机三相转子绕组适当连接并通入直流励磁电流，使其呈同步电动机运行，这就是“异步电动机同步化”。因而只要调节电动机的直流励磁电流，使其呈过励状态，即能向电网输出无功功率。

四、柔性输电（FACTS）技术——静止无功补偿器（SVC）

静止无功补偿器（Static Var Compensators, SVC）是近年来国内新发展起来的一种无功补偿与电压调节设备，但国外应用已很久。其特点是调节迅速，运行维护量小，可靠性高，可提供可变动的容性和感性无功电源。它由电容器和可调节的电抗器并联组成，采用晶闸管或电抗器饱和特性控制，对冲击性负荷特别适宜。在实际运行中有许多不同型式的静止补偿器，它们的特性差别相当大，主要有晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）和饱和电抗器（SR）。TCR 和 SR 补偿器通常都和电容器组一起使用。由于静止无功补偿器快速响应的特点，因而主要用在配电网中抑制冲击性负荷如轧钢机、电弧炉、电焊机等引起的电压闪变。

五、柔性输电（FACTS）技术——静止同步补偿器（STATCOM）

STATCOM 或 SSC（Static Synchronous Compensator）是一种并联型无功补偿装置，它能够发出或吸收无功功率且不需要大量外部的电抗器或电容器组。一般的，STATCOM 是一种固态开关变流器，当其输入端接有电源或储能装置时，其输出端可独立发出或吸收可控的有功和无功功率。STATCOM 也可比作一台理想的同步电机，能产生一组平衡的、幅值和相角可控的三相正弦基频电压，可发出容性或感性无功功率。STATCOM 可在输电和配电系统中进行动态电压控制，对输电系统中的功率振荡产生阻尼作用，提高系统的暂态稳定性。

1.1.2.2 静态的无功电源

一、并联电容器

由于电网元件的阻抗和用电负荷主要是感性的，因此，其所需的感性无功功率主要应由容性无功功率进行补偿，而并联电容器成为补偿电力系统无功需求的主要无功电源。并联电容器最大的特点是价格便宜并易于安装，缺点是其输出无功容量随安装处母线电压的降低而呈平方倍地下降。

二、并联电抗器

并联电抗器在电力系统中广泛应用于限制工频过电压、消除发电机自励磁、限制操作过电压和线路容性充电功率等。并联电抗器常用来做补偿线路的电容，特别是用来限制由于线路开路或轻载而引起的电压升高。对于长距离线路，在限制线路充电时末端电压上升过高、限制甩负荷造成的过电压以及避免发电机自励磁产生过电压方面，高压电抗器都起主要作用。另外，装设并联电抗器也有利于电网分层的无功功率平衡及电压稳定。

三、输电线路充电功率

高压及超高压架空输电线路以及电缆线路的充电功率（Charging Reactive Power）为无功电源。电网运行中输电线路既是无功负荷也是无功电源。其产生的无功功率与运行电压的平方成正比，其消耗的无功功率与其导线通过的电流平方成正比。输电线路的等值电路如图 1-3 所示。

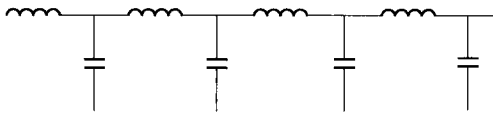


图 1-3 输电线路的等值电路图

输电线路充电功率

$$Q_L = U^2 B \quad (1-5)$$

$$B = \omega C$$

式中 ω ——系统角频率， $\omega = 2\pi f$ ， $f = 50\text{Hz}$ ；

C ——线路电容，F；

Q_L ——输电线路充电功率，Mvar；

U ——运行电压，kV；

B ——线路并联电纳，S。

输电线路并联电容或称充电电容发出的无功功率正比于电压的平方。由于

线路的运行电压偏差在一定的范围内，因此输电线路发出的无功功率基本上恒定。输电线路充电电容发出的无功功率见表 1-1。

表 1-1 输电线路充电电容发出的无功功率

电压等级 (kV)	110	220		330	500		750
导线型式	单根	单根	双分裂	双分裂	三分裂	四分裂	四分裂
充电功率 (Mvar/km)	0.034	0.14	0.19	0.41	1.03	1.18	2.4

35kV 及以上电缆线路充电功率见表 1-2。

表 1-2 35kV 及以上电缆线路充电功率

充电功率 (Mvar/km)	电压等级 (kV)	截面 (mm ²)				
		35	110	220	330	500
100		—	1.07	—	—	—
180		—	1.2	—	—	—
270		—	1.23	3.25	6.5	—
400		0.09	1.26	3.57	7.2	—
600		0.1	1.52	3.9	7.77	—
680		—	1.58	4.05	8.0	17.3
920		0.12	1.75	4.45	8.74	—

1.1.3 无功负荷

无功功率需求包括相位超前运转的发电机、输电线的电感、变压器的电感、相位滞后的调相设备（进行相位滞后运转的同步调相机）、用户的相位滞后负荷。无功负荷为电网中不作功的部分，各种交流电动机在消耗有功功率的同时也吸收无功功率。以下介绍电网中主要的几种无功负荷。

(1) 异步电动机。异步电动机 (Induction Motors) 是电网中主要的感性无功负荷。

(2) 变压器。变压器 (Transformers) 也是电网中主要的无功负荷，它消耗的无功功率包括两部分，即空载励磁无功功率和负荷电流通过漏抗产生的无功损耗。变压器总的无功功率损耗约占变压器额定容量的 10%~20%。另外，变压器无功功率损耗在空载或轻载运行时主要受励磁电流影响；在重载运行时

主要受负荷电流和漏抗的影响。

(3) 输电线路。因输电线路 (Transmission Lines) 不仅有分布电阻和分布电容, 还有分布电抗, 当线路通过传输功率时, 分布电抗也要吸收无功功率。线路的无功损耗 (Reactive Power Losses) 与输送的有功功率成正比, 输送有功功率越大, 则无功损耗越大; 与功率因数平方成反比。

输电线路串联电抗上的无功损耗为

$$Q_s = I^2 X = (P^2 + Q^2) X / U^2 \quad (1-6)$$

式中 Q_s ——线路串联电抗无功损耗, Mvar;

I ——线路流过的电流, kA;

X ——输电线路串联电抗, Ω ;

P ——线路传输的有功功率, kW;

Q ——线路传输的无功功率, kvar;

U ——运行电压, kV。

输电线路的串联电感消耗的无功功率正比于电流的平方, 当电流值在重载和轻载之间变化时, 输电线路的无功损耗也相应变化。因而输电线路的净无功功率将随着负荷水平不断改变, 且有: 输电线路发出无功功率为 $U^2 B$ (相对恒定); 输电线路消耗无功功率为 $I^2 X$ (变化)。其中, $B (= \omega C)$ 为线路并联电纳, $X (= \omega L)$ 为线路串联电抗。

1.1.4 无功功率传输

通常人们只关心电压幅值的变化, 但在电网的受端或负荷端发生系统电压严重降低或崩溃的紧急状况下, 输电线路或变压器的无功功率传输能力及无功电源事故储备对维持系统安全运行将至关重要。与有功功率不同, 影响无功功率潮流分布的主要因素为网络阻抗、变压器分接头和节点电压。无功功率传输 (Reactive Power Transmission) 大小主要取决于电压的幅值, 传输方向为由电压高的一端流向电压低的一端。

1.1.4.1 线路的自然功率 (波阻抗功率)

当线路发出的无功功率恰好等于其消耗的无功功率时的传输功率称为线路的自然功率或波阻抗功率。设单位长度线路的电抗为 x , 电纳为 b , 令 $U^2 b = I^2 x$, 可得线路的波阻抗或称为特征阻抗, 即

$$Z_0 = U/I = \sqrt{x/b} \quad (1-7)$$

自然功率或波阻抗功率则为

$$P_0 = U^2 / Z_0 \quad (1-8)$$

从多方面而言，波阻抗功率对应于输电线路的理想负荷状况。不仅线路发出的无功功率等于线路消耗的无功功率，而且沿线路各点电压和电流的幅值大小相同。其中，沿线路各点电压幅值恒定，此外，沿线路各点电压和电流的相位也相同。长线路的功率传输水平不可能过多地高于线路未补偿时的波阻抗功率。

1.1.4.2 线路无功功率传输

在运行中发现，一些输电线路在大功率潮流传输过程中，虽然在线路送端注入了大量的无功功率，但在受端却没有任何无功功率流出，并且受端无功功率还为负值。这表明从受端向线路注入了一定量的无功功率，当无功功率为负值时，输电线路对受端系统实际相当于一个无功负荷，输电线路成了系统消耗无功功率的元件，而线路的无功损耗等于送端和受端注入的无功功率之和。因此，输电线路在重载情况下无功功率消耗将大大增加，为保证该节点应有的电压水平，线路两端需要增加更大的无功电源。

架空线路产生或吸收无功功率取决于其传输电流的大小。当传输功率低于自然功率（波阻抗功率）时，线路产生无功功率；当传输功率高于自然功率（波阻抗功率）时，线路吸收无功功率。电缆由于对地电容较大，因此具有较高的自然功率，又由于通常工作在低于自然功率的状态运行，因而总是在产生无功功率。

减小线路无功功率传输的第一个原因是无功功率传输存在难度，表现在如果线路两端电压相角差较大，则即使两端电压幅值差值再大，也不可能通过该线路传输无功功率。长线路或重载情况都可能导致两端电压相角差增大。根据电力系统运行要求，各点电压幅值应维持在 $(1 \pm 10\%)$ 额定电压的范围内，这更增加了无功功率传输的难度。因此相对于有功功率传输而言，无功功率不能长距离传输。

减小线路无功功率传输的第二个原因是为了减小线路的有功和无功损耗。为保证电力系统运行的经济性，输电线路的有功损耗应降至最低；同样，为减少并联电容器等无功补偿设备的投资，输电线路的无功损耗也应降至最低。电网运行中无功损耗占无功负荷的30%~50%，无功电源和负荷要就地平衡，不应长距离输送，尽可能减少电网有功损耗。输电线路上的有功和无功损耗分别为 P_s 和 Q_s ，即

$$P_s = I^2 R = (P^2 + Q^2) R / U^2 \quad (1-9)$$

$$Q_s = I^2 X = (P^2 + Q^2) X / U^2 \quad (1-10)$$

由式(1-9)和式(1-10)可知,为使线路的功率损耗最小,必须使线路传输的无功功率最小,同时还应保持高的电压水平。

减小线路无功功率传输的第三个原因就是为减小由于甩负荷(Load Rejection)引起的线路短时过电压,其中最严重的情况是长线路负荷侧断路器突然跳闸,而线路通过送端仍闭合的断路器使其处于带电状态,电压异常升高,易损坏电气设备绝缘。

无功补偿与控制的基本要求是保证电力系统的无功平衡。输电线路既发出无功功率也消耗无功功率,由两者所决定的净无功功率必须由线路两端的系统来吸收,或者由其来提供。

1.1.5 无功补偿

通常电网需要的无功功率比有功功率大得多,若综合发电最高负荷为100%,则无功功率总需量约为120%~140%。但发电机的额定功率因数一般大于0.8,而负荷功率因数一般小于0.8,因此单靠发电机的无功出力不能平衡自然负荷所需的无功功率,由于不选择长距离输送无功功率,因此,就产生了无功补偿的问题。

无功补偿(Reactive Power Compensation)是指为满足电力网和负荷端电压水平及经济运行的要求必须在电力网和负荷端设置无功电源,如电容器、调相机等。

在初期的交流电网中,因为发电厂靠近负荷中心,并不需要专门的无功补偿设备。随着电网的不断发展,为了改善负荷的功率因数,逐步采用了同步电动机、小型同步调相机和并联电容器。虽然无功功率基本上不消耗能源,但无功功率传送却要引起有功功率损耗和电压波动,合理地配置无功功率补偿容量,优化电力网的无功潮流分布,可以减少网络中的有功功率损耗和电压波动并改善用户端的电压质量。由于电网元件的阻抗和用电负荷主要是感性的,因此其所需的感性无功功率主要应由容性无功功率进行补偿,而并联电容器由于其价格便宜并易于安装而成为补偿电力系统无功需求的主要无功电源,因此国内外对于35~500kV变电站的无功补偿主要选择是并联电容器。

当并联电容器组接入点母线电压低于容许限度时,可通过投退并联电容器组进行调压。但多数情况下投入并联电容器组是为了提高功率因数、降低电网损耗。

1.1.5.1 无功补偿的原则

一、无功补偿配置总的原则

电网应在系统负荷高峰和负荷低谷运行方式下,保证分(电压)层和分