

远距离电力波输电的仿真研究

滕福生

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:介绍利用远距离输电线FPT的均匀分布参数而形成的波传输特性,即电力波将大容量的电力送往远区受端系统的有关仿真实论和方法。应用仿真技术对各种长度的远距离电力波输电FPTW的主要特性进行了仿真研究,并分析了有关的仿真结果,为进一步的规划和应用工作,提供了有意义的基础参考资料。

关键词:远距离输电;电力波输电;仿真研究

Abstract: The theories and techniques for simulation of the bulk capacity far power transmission by wave(FPTW) caused by the performance of distributed continuous parameters of far power transmission (FPT) line are presented. The simulation results of its important characteristics are analyzed for the work of development successfully.

Key words: far power transmission; power transmission by wave; simulation technique

中图分类号:TM722 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6954(2008)11-0001-04

中国西部有着丰富的水电资源,特别是四川省的水电资源开发以后,如近期开始的金沙江上的梯级水电站的开发,总容量可达50 GkW以上,不仅足够供给本地区用电外,需要将几千万千瓦的电力,送往几千公里以外的东部和南部缺乏能源的地区,这是大家非常关心的西电东送和川电外送的重大任务。值得注意的是,通常由短线发展的补偿型输电方式,即采用并联电抗器补偿线路分布电容^[1],有时还要用串联电容补偿线路电感,当线路长度在1 000 km以上时,若采用500 kV的电压等级,输电能力的技术经济性降低,所以,也正在致力于1 000 kV线路的开发工作^[2]。理论上分析,当线路长度大于750 km,可以利用线路分布参数形成的电磁波特性和波的传播方式输电^[3],称为远距离电力波输电FPTW或简称为电力波输电PTW。这种输电方式,不用并联电抗器补偿,也不用串联电容器补偿,而是利用远距离输电线路本身的分布参数,只要选择适当的波阻抗值,就可以把大容量的电力,送往远区受电系统。

电网工频为50 Hz,远距离输电线波传播特性的波长为6 000 km。当线路长度大于八分之一波长,即750 km,波传播特性开始显著;线路越长,波传播特性越有意义。为此,可以把远距离输电线路按长度分为:

- 1) 长线路LDL:线路长度大于750 km,小于1 500 km。
- 2) 超长线路SDL:线路长度大于1 500 km,小于

3 000 km。

- 3) 特长线路UDL:线路长度大于3 000 km。

中国西部水电开发送出的输电线路,如按上述划分,有不少长线路和超长线路。如要开发西藏的水电资源外送,也可能出现特长输电线路。

仿真研究是重要课题在理论研究的基础上,为进一步的开发研究的实用转化进行论证的重要工作^[4]。由于远距离输电的波动特性,线路的电压分布,在空载运行时,防止过电压是突出的课题。又当逐渐增大线路的输送功率到满载,还需要根据稳定的要求,仿真发电机的励磁调节,保证输电线路的发端电压为要求值。

1 仿真模型

远距离分布参数的输电线FPT,它的等值电路如图1所示。

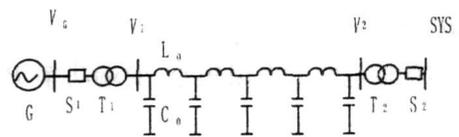


图1 FPT分布参数等值图

图1中: L_0 和 C_0 为输电线路单位长度的电感和电容; V_1 为输电线路发端的电压; V_2 为输电线路受

端的电压; T_1 和 T_2 分别为发端升压变压器和受端降压变压器。 G 为发电机, 其端电压为 V_G 。

FPT 的受端运行方程的矩阵形式^[3]为:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l - Z_w \sinh \gamma l \\ -\frac{1}{Z_w} \sinh \gamma l \cosh \gamma l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在发端运行方程为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_w \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_w} \sinh \gamma l \cosh \gamma l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上两式中:

$$\gamma = \sqrt{(R_o + j\omega L_o)(G_o + j\omega C_o)} \quad (3)$$

称为传播常数;

$$Z_w = \sqrt{\frac{R_o + j\omega L_o}{G_o + j\omega C_o}} \quad (4)$$

称为特性阻抗。

一般的大容量输电线, 它的单位长度电阻 R_o 较电感 L_o 小, 电导 G_o 较 C_o 小, 于是:

$$\gamma = j\omega \sqrt{L_o C_o} = j\beta \quad (5)$$

$$Z_w \doteq R_w \doteq \sqrt{\frac{L_o}{C_o}} \quad (6)$$

R_w 相当于纯电阻。

式(1)和(2)用 R_w 表示为:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l - jR_w \sin \beta l \\ -j \frac{1}{R_w} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

和

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jR_w \sin \beta l \\ j \frac{1}{R_w} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

FPT 发端的输入阻抗为 R_w , 则输入发端的有功功率 P_1 为:

$$P_1 = \text{Re}(V_1 \cdot I_1) = \frac{V_1^2 \Delta}{R_w} = P_w \quad (9)$$

上式说明, 由于 R_w 与线路的长度 l 无关, 所以, P_1 就只与 V_1 和 R_w 有关。而与 l 无关, 称为自然功率, 用 P_w 表示。

大容量输电线的电阻很小, 受端功率 P_2 可以简化计算用:

$$P_2 = \frac{V_2^2}{R_w} \doteq \frac{V_1^2}{R_w} \quad (10)$$

当使 P_2 为输电线路经 T_2 送到受端系统的功率时, 受端等效阻抗也为 R_w 。

波阻抗 R_w 是具有分布参数的远距离输电线, 因

形成电磁波传播电力的一个重要参数。它是由 L_o 和 C_o 而定。 L_o 和 C_o 只与输电线路的结构和架设方式有关, 所以, R_w 就由线路的结构和架设方式而定, 有:

$$R_w = \frac{k_w}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{D_p}{r_p} \quad (11)$$

式中: k_w 为一常数, 对三相架空线路, 其值约为 138; D_p 为三相线路的平均相间距离; r 为每根导线的半径; d 为分裂导线间距; r_p 为每相分裂导线的等效半径, 单位为 m; ϵ 为导线外介电常数。

导线可以用空气作介质, 也可以外加介质套层, 介电常数 ϵ , 为^[5]:

空气为 1; 聚氯乙烯 6; 聚苯乙烯 2.5。

因此, 选择 D_p 和 r_p , 以及 ϵ , 可以选定一个合适的波阻抗值。 R_w 可作到小于 200 Ω 。

例如, 当 R_w 选定为 200 Ω , $V_{1m} = 1.05 \times 500$ kV, 则最大输送功率 P_{1m} 为:

$$P_{1m} = \frac{525^2}{200} = 1378 \text{ MW} = 1.4 \text{ GW}$$

又如, 当 R_w 选定为 220 Ω

$$V_{1m} = 1.05 \times 1000 \text{ kV}$$

$$P_{1m} = \frac{1050^2}{220} = 5.0 \text{ GW}$$

用一回三相输电线路, 既不用并联电抗补偿, 又不用串联电容补偿, 因 R_w 与输电距离无关, 只由 V_1 和 R_w 决定这样大的输电功率, 输送到远距离以外的受电系统, 这显然具有很大的技术经济性。

500 kV 的输电电压等级, 采用这种 FPTW 的系统接线方式, 可以用扩大单元接线方式, 如图 2 所示。

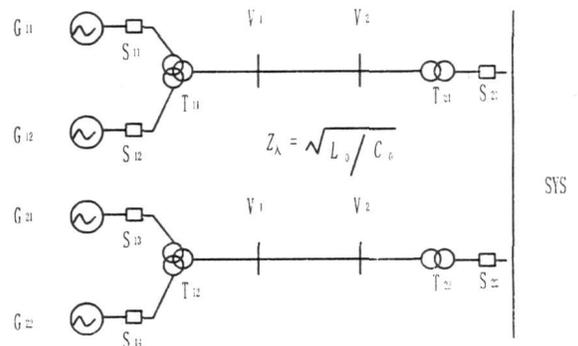


图 2 扩大单元接线

两台 600 MW 或 700 MW 发电机分别经过开关 S_{11} 和 S_{12} 以及升压变压器 T_{11} , 接入一回输电线路, 在受端又经降压变压器 T_{21} 和开关 S_{21} , 接入受端系统 SYS。当有多回线路时, 分别在受端 SYS 并联。这种

在发端和受端由于没有补偿电抗器,就可以不用 500 kV 的高压开关,既节约投资,又简化系统的运行和维护工作,显著提高系统的可靠性和经济性。

2 电压分布和仿真

远距离均匀分布参数的输电线路,在空载投入运行时,线路先接发电端或接受电系统,应该由空载情况要求线路上任何一点都不能出现过电压决定。而且,为了保证受端电压 V_2 为规定值,线路投入运行从空载到满载的电压分布情况,必须在理论研究的基础上,进一步进行仿真分析印证。为此,按照上述数学模型,编制了面向波传播对象和可视化的仿真软件 BZSL-4.0,可以对各种线路长度的 FPTW 进行仿真计算,得到线路全长的电压分布和相关的电压控制措施。

2.1 长距离输电线 LDL

LDL 的线路长度按线路的波传播特性为 750~1 500 km,即 $1/8 \sim 1/4$ 波长的距离。如线路长度 l 一定,由式(8)可得:

$$V_1 = V_2 \cos \beta l + jI_2 R_w \sin \beta l \quad (12)$$

当 $I_2 = 0$,即空载, V_{10} 和 V_{20} 的关系为:

$$V_{10} = V_{20} \cos \beta l \quad (13)$$

显然, V_2 为额定值 V_{2e} ,则可以求得 V_{10} 的大小。如线路长度为 1 200 km 得到仿真曲线见图 3。

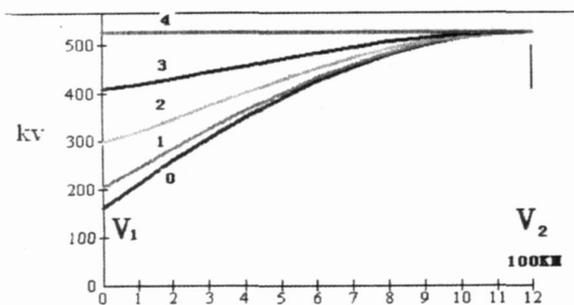


图3 长距离输电的电压分布曲线

图3中的曲线0表示空载的情况,由该曲线可见:为保证线路的 V_2 为受端系统要求值 V_{2e} ,在线路的发端,电压则应为 V_{10} 。

$$\text{由于 } V_1 = K_{T1} V_G \quad (14)$$

这里, K_{T1} 为 T_1 的电压变比。

为此,使用发电机的励磁调节器,调节发电机的端电压为 V_{G0} ,也就对应调节线路发端电压 V_1 ,为 V_{10} 。在发电机的电压为 V_{G0} 的情况下,将发电机经升压变压器与输电线连接,就可以保证空载线路的受端电压为 V_{2e} 。

这样,就可以将输电线路,在受端经过降压变压器与受端系统连接。要增大线路的输送功率,由式(10)可见,只要逐渐提高输电线路发端的电压,如图3中的电压分布曲线1、2、3和满载的曲线4所要求的发端电压为:

$$V_{11}, V_{12}, V_{13} \text{ 和 } V_{14}$$

也就对应要求调节发电机端电压为:

$$V_{G1}, V_{G2}, V_{G3} \text{ 和 } V_{G4}。$$

所以,只要调节发电机的励磁控制发电机的电压,就能控制输电线路的发端电压,也就能保证线路电压的安全性和调整线路的输送功率。

2.2 超长距离输电线 SDL

SDL 的线路长度按线路的波传播特性为 1 500~3 000 km,即 $1/4 \sim 1/2$ 波长的距离。如线路长度为 2 200 km,仿真结果如图 4。

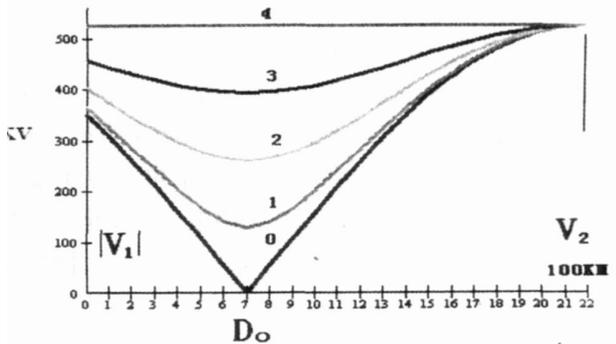


图4 超长距离输电的电压分布曲线

从图4中值得注意的是:在线路空载时,距线路受端 $1/4$ 波长的 1 500 km 处 D_0 ,电压为 0,即空载线路的 0 电压点。只有保证这一点的电压为 0,即在这一位置设置“接 0 开关”,加以控制达到。然后,先将输电线路与受端连接,保证线路电压的安全。空载线路在发电端,要通过变压器与发电机联接,同样要求调节发电机的励磁,使发电机的端电压,能使线路的发端电压 V_1 为 V_{10} 。这样,就可以将发电机通过开关和升压变压器接到输电线路发端。

要增大输电功率,断开“接 0 开关”,提高线路发

端电压 V_1 , 也就是用发电机的励磁调节器调节 V_1 来改变 P_1 的大小, 如图 3 中的曲线 1、2、3、4 分别表示依次增加线路输送功率时, 需要增大发电机的出力和电压, 以提高线路的发端电压, 沿线路电压分布的曲线。曲线 4 表示线路功率达到自然功率的电压分布情况。

2.3 特长距离输电 UDL

UDL 的线路长度为 3 000 km 以上, 即 $1/2$ 波长以上的距离。如线路长度为 3 500 km, 仿真结果如图 5。

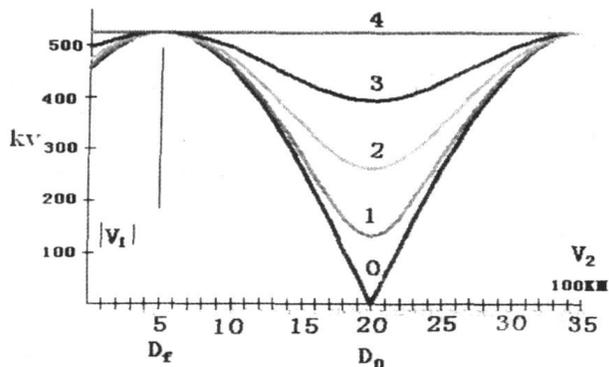


图 5 特长距离输电的电压分布曲线

与 SDL 的曲线相比较, 在线路空载时, 除了距线路受端 $1/4$ 波长的 1 500 km 处 D_0 , 电压为 0, 即空载线路的 0 电压点外, 距线路受端 $1/2$ 波长的 3 000 km 处 D_f , 还出现电压的“峰点”, 在该处, 电压为最大值。

只有保证空载线路的 0 电压点的电压为 0, 输电线路与受端连接时, 才能保证线路电压的安全。空载线路在发电端, 要通过变压器与发电机联接, 同样要求调节发电机的励磁, 使发电机的电压, 能使线路的发端电压 V_1 为 V_{10} 。

要提高线路输送功率, 同样用提高发端电压 V_1 , 也就是用发电机的励磁调节器调节 V_1 来改变 P_1 的大小, 如图 5 中的曲线 1、2、3、4 分别表示依次增加线路输送功率时的电压分布曲线。

3 系统静稳定性

用 FPTW 传送功率时, V_1 和 V_2 间的线路长度为 l , 则 V_1 和 V_2 间的相位差 θ_{12} 为:

$$\theta_{12} = 2\pi l / \lambda_w \quad (15)$$

这相位差角, 只由线路长度 l 和电磁波的波长 λ_w 决定, 与输送的功率大小无关。如一回距离为 1 200

km 的 500 kV 线路, 则:

$$\theta_{12} = 2\pi \cdot 1\ 200 / 6\ 000 = 72^\circ$$

又如距离为 2 200 km, 则

$$\theta_{12} = 2\pi \cdot 2\ 200 / 6\ 000 = 132^\circ$$

再如距离为 3 500 km, 则

$$\theta_{12} = 2\pi \cdot 3\ 500 / 7\ 000 = 210^\circ$$

由于 V_1 和 V_2 间相位差角 θ_{12} 只受电磁场和波的作用, 而由线路长度决定为一定值, 并不随输送功率的大小而变化的特点, 也就保证了两端的同步性。因此, 这就为提高发电机的静稳定性提供了有利的条件。远区发电厂的功率特性当系统采用扩大单元接线时, 可简化为:

$$P = \frac{EV_1}{X_{GT}} \sin \delta \quad (16)$$

式中: E 为发电机计算用电势; X_{GT} 为发电机和升压变压器电抗之和。

发电机的励磁调节用于既调节 V_1 来改变 P_1 的大小, 又在一定的 P_1 情况下维持 V_1 恒定的调节方式, 则功率极限为:

$$P_m = \frac{EV_1}{X_{GT}} \quad (17)$$

这一 P_m 值, 显然较包括有输电线路的电抗时的功率极限值高。

4 结论

远距离输电 FPT 的均匀分布参数形成电力波的输电特性, 以电磁场和电磁波的传播方式, 将远区发电厂的大容量电能沿线路传输到受端系统, 其输电特性, 只由波阻抗大小和线路发端电压决定, 而与线路长度无关。为了保证线路不出现过电压, 需要采取如下措施:

1) 从空载到满载, 应根据线路长度所决定的线路发端电压 V_1 , 调节发电机的励磁以控制发电机的电压, 使 V_1 为要求值。

2) 线路长度大于 1 500 km, 在距受端 1 500 km 处, 设置线路的电压“0 点”控制。

3) 线路长度大于 3 000 km, 在距受端 3 000 km 处, 为线路的电压“峰点”, 需要加以过压控制和保护。

采用电力波的远距离输电 FPTW 方法, 由于不需要安装并联电抗器, 采用扩大单元接线方式, 还可以减少高压开关, 以较大的技术和

(下转第 60 页)

km, 改造新立杆塔 400 多基。

3 通信

配网自动化的通信包括主站对子站、主站对现场终端、子站对现场终端、子站之间、现场终端之间的通信等广义的范围。通信是实施配网自动化的一个重点和难点, 区域不同、条件不同, 通信方案也多种多样, 主要有光纤、有线电视、电力载波、微波、扩频等, 但就目前配网自动化技术不够成熟的情况下, 采用混合通信方案是比较符合实际的原则。德阳局实现的方案为: 主站与子站之间采用单模光纤, 并以光纤以太网方式相连, 通过协议转换器、交换机等实现主站与子站的通信; 子站与干线上的 FTU、开闭所、环网柜之间采用单模光纤, 通过光纤双环相连(采用单模双发双收的光 MODEM) 实现带自愈的双环通信。正常情况下, 只有一个环路在使用, 当发生故障时, 光端机能自动检测故障点, 启用第二个环路完成通信, 正常装置仍能保持通信畅通和链路完好。

4 配网自动化实施中应注意的问题

1) 配网自动化的实施涉及的部门多, 投资大, 是一项系统工程, 因此配网自动化的规划是必不可少的, 必须结合当地配电网的发展规划, 制定详细的配网自动化的实施计划, 整体考虑, 分期分批实施, 同时要和企业内部信息化建设相协调。另外, 从供电局的实际需要和发展需求出发, 目前的配网自动化系统应该实现配(网)调(度)合一的设计, 技术上统一平台, 管理上易于维护, 经济上节约资金, 同时也奠定了

将来电力企业信息化的基础。在实施过程中, 注重已有的调度自动化的升级改造与建设配网自动化统一考虑, 新上调度自动化与建设配网自动化统一考虑。

2) 配电线路设备的户外运行环境, 对开关设备、配电终端设备等提出了更高的要求, 必须考虑雷击过电压、低温和高温工作、雨淋和潮湿、风沙、振动、电磁干扰等因素的影响, 在开关的外绝缘材料、电子设备的设计、元器件的筛选等方面应综合考虑其性价比。此外, 配电自动化系统中的站端设备进行远方控制的频繁程度比输电网自动化系统要高的多, 因此要求配电自动化系统中的站端设备具有更高的可靠性。

3) 配电终端设备中的电源用于控制开关动作, 正常情况下从线路中取得, 线路失电后的后备电源应具有较高的可靠性。

4) 在实施配网自动化后, 降低了运行人员的劳动强度, 提高了劳动效率, 使运行人员对网络的运行状况掌握得更全面更快捷, 为供电企业创造更好的经济效益和社会效益。配网自动化的实施, 改变了配电网传统的运行管理方式, 但对运行人员提出了较高的要求。

5 结束语

经济的发展对配电网自动化提出了更高的要求, 配电网自动化也是电力系统现代化发展的必然趋势。技术在发展, 需求也在提高, 应参照发达国家和地区的经验, 结合实际情况, 综合考虑近期与远期、全局与局部、主要与次要的关系, 进一步设计开发出先进、通用、标准的配电网自动化系统, 对电力市场的发展具有重要意义。
(收稿日期: 2007-11-20)

(上接第 4 页) 经济效益, 输送大容量的电能到各种长度的远距离外的受端系统。这是一个值得关注并具有中国自主知识产权的课题。

参考文献

[1] Oille I. Elgerd. Electric Energy System Theory, WcGraw - Hill, 2 nd Edition, 212-214.

[2] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实施[J]. 中国电力, 2005, (8): 9-12.

[3] 滕福生, 滕欢. 面向波阻抗的长距离输电研究[J]. 电网

技术, 2007, (31)6: 70-72.

[4] J. Yang, M. D. Anderson. PowerGraf; : An Educational Softrawe Package for Power Systems Ananlysis and Design. IIIE Tran- section on Power System, 1998, (13)4: 1205-1210.

[5] 冯全跃, 李广泽. 动力工程师手册[M]. 西北电力设计院, 1992, 211.

(收稿日期: 2007-11-18)

作者简介:

滕福生(1929-), 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统和长距离输电的教学、科研和工程技术工作。