

# 风电场 35kV 集电线路压降及损耗研究

王芳

中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司

DOI:10.18686/hwr.v1i1.364

**摘要:**风电场的集电线路采用架空线路集电或者电缆集电,这两种方式在电压降落和电能损耗上有何不同,风机发不发无功对电压降落和电能损耗产生什么样的影响,本文将提供具体算例进行对比说明,目的在于找到其中的规律,并提供电压降落的具体计算方法。

**关键词:**风电场;集电线路;电压降落;电能损耗;无功;计算方法

## 前言

目前,风电场的集电线路中较多采用架空线路集电或者电缆集电,这两种方式下在电压降落和电能损耗上有何不同,风机发不发无功对电压降落和电能损耗产生什么样的影响,本文将广西武鸣安凤岭第四组风机为例做详细计算研究。

### 1 风机连接接线

本组共有13台2000kW风机连成一串送至升压站,从G25~G15,G13~G15,再从G15送到升压站。架空线接线为:每台风机经1kV电缆接至箱变,从箱变高压侧再经100米长YJV22-35kV-3\*70mm<sup>2</sup>的铜芯电缆接至架空线,最后经200米长YJV22-26/35kV-3\*240mm<sup>2</sup>的铜芯电缆接至升压站;电缆接线为:采用YJLV22铝芯电缆,每根电缆均从箱变转接。每段线路的截面及长度标于下文的各计算图中。为了便于比较,按架空线的长度等于电缆的长度。

### 2 基本参数

2.1 风机:额定功率P=2MW,cosφ=+-0.95,额定无功Q=P\*tgφ=0.6573Mvar

2.2 箱变:额定容量SN=2250kVA=2.25MVA,变比36.75+-2\*2.5%/0.69kV,阻抗电压U<sub>d</sub>=6.5%,负载损耗P<sub>k</sub>=18.9kW,空载损耗P<sub>0</sub>=2.33kW,箱变满载有功损耗ΔP<sub>T</sub>=P<sub>k</sub>/1000=0.0189MW,箱变满载无功损耗ΔQ<sub>T</sub>=U<sub>d</sub>%\*SN/100=6.5\*2.25/100=0.1463Mvar,

箱变电阻R<sub>T</sub>=P<sub>k</sub>\*U<sub>N</sub><sup>2</sup>/(1000\*S<sub>N</sub><sup>2</sup>)=18.9\*35<sup>2</sup>/(1000\*2.25<sup>2</sup>)=4.5733Ω,

箱变电抗X<sub>T</sub>=U<sub>d</sub>%\*U<sub>N</sub><sup>2</sup>/(100\*S<sub>N</sub>)=6.5\*35<sup>2</sup>/(100\*2.25)=35.3889Ω

2.3 铜芯电缆YJV22-26/35-3\*70:60℃时每公里电阻r=0.305Ω/km,每公里电抗x=0.128Ω/km

2.4 铜芯电缆YJV22-26/35-3\*240:60℃时每公里电阻r=0.09Ω/km,每公里电抗x=0.104Ω/km

2.5 钢芯铝绞线LGJ-120/25:每公里电阻r=0.27Ω/km,每公里电抗x=0.38Ω/km

2.6 钢芯铝绞线LGJ-185/25:每公里电阻r=0.17Ω/km,每公里电抗x=0.365Ω/km

2.7 钢芯铝绞线LGJ-240/30:每公里电阻r=0.132Ω/km,每公里电抗x=0.358Ω/km

2.8 铝芯电缆YJLV22-26/35-3\*95:80℃时每公里电阻r=0.405Ω/km,每公里电抗x=0.126Ω/km,每公里电容c=0.135\*10<sup>-6</sup>f/km

2.9 铝芯电缆YJLV22-26/35-3\*240:80℃时每公里电阻r=0.16Ω/km,每公里电抗x=0.11Ω/km,每公里电容c=0.176\*10<sup>-6</sup>f/km

### 3 损耗及电压降落计算

计算基本条件:按每台风机均满发,箱变损耗按满容量损耗计算,这样可计算出每个风机接入点输入的功率,同时假定已知升压站35kV母线的电压为36.75kV。计算基本公式:线路的电阻R=r\*L,线路的电抗X=x\*L,有功损耗ΔP= $\frac{P^2+Q^2}{U_N^2}R$ ,无功损耗ΔQ= $\frac{P^2+Q^2}{U_N^2}X$ ,电压降落ΔU= $\frac{PR+QX}{U}$ ,每段电缆线路充电功率的一半:0.5Q<sub>c</sub>=0.5ωU<sub>N</sub><sup>2</sup>cL=0.5\*314U<sub>N</sub><sup>2</sup>cL,L为电缆km长度。

### 4 架空线路,风机不发无功时的损耗及电压降落计算

各箱变高压侧功率:S<sub>1</sub>'=P-(ΔP<sub>T</sub>+jΔQ<sub>T</sub>)=2-0.0189-j0.1463=1.9811-j0.1463,

100米电缆YJV22-35kV-3\*70mm<sup>2</sup>的电阻、电抗及有功无功损耗:R<sub>1</sub>+jX<sub>1</sub>=r\*L+jx\*L=0.305\*0.1+j0.128\*0.1=0.0305+j0.0128

$$\Delta P_1 = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_N^2} R = \frac{1.9811^2 + 0.1463^2}{35^2} \times 0.0305 = 0.0001 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_1 = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_N^2} X = \frac{1.9811^2 + 0.1463^2}{35^2} \times 0.0128 = 0.00004 \text{ M var}$$

各风机至架空线始端注入的功率:S<sub>1</sub>'=S<sub>1</sub>'-(ΔP<sub>1</sub>+jΔQ<sub>1</sub>)

$$= 1.9811 - j0.1463 - (0.0001 + j0.00004) = 1.981 - j0.14634,$$

架空线路2始端注入的功率:S<sub>2</sub>'=S<sub>1</sub>'

架空线路2上的电阻、电抗及有功无功损耗:

$$R_2 + jX_2 = r*L + jx*L = 0.27*0.353 + j0.38*0.353 = 0.0953 + j0.1341,$$

$$\Delta P_2 = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_N^2} R = \frac{1.981^2 + 0.14634^2}{35^2} \times 0.0953 = 0.0003 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_2 = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_N^2} X = \frac{1.981^2 + 0.14634^2}{35^2} \times 0.1341 = 0.0004 \text{ Mvar}$$

架空线 2 末端注入的功率  $S_2'' = S_2' - (\Delta P_2 + j\Delta Q_2) = 1.981 - j0.14634 - (0.0003 + j0.0004) = 1.9807 - j0.1467$ ,

架空线 3 始端注入的功率  $S_3' = S_2'' + S_1'' = 1.9807 - j0.1467 + 1.981 - j0.14634 = 3.9617 - j0.293$ ,

依此类推, 计算出各段线路阻抗始端注入的功率、线路阻抗上损耗的有功无功、末端注入的功率, 其中风机 15 节点注入的功率  $S_{14}' = S_{11}'' + S_1'' + S_{13}''$ 。

计算出各处的有功无功后, 压降计算从已知电压的升

压站往风机方向进行计算。以功率从升压站往风机方向为正, 则有功为负值, 无功在此种情况下为正值。

电压降落计算  $U_{15}'' = 36.75 \text{ kV}$

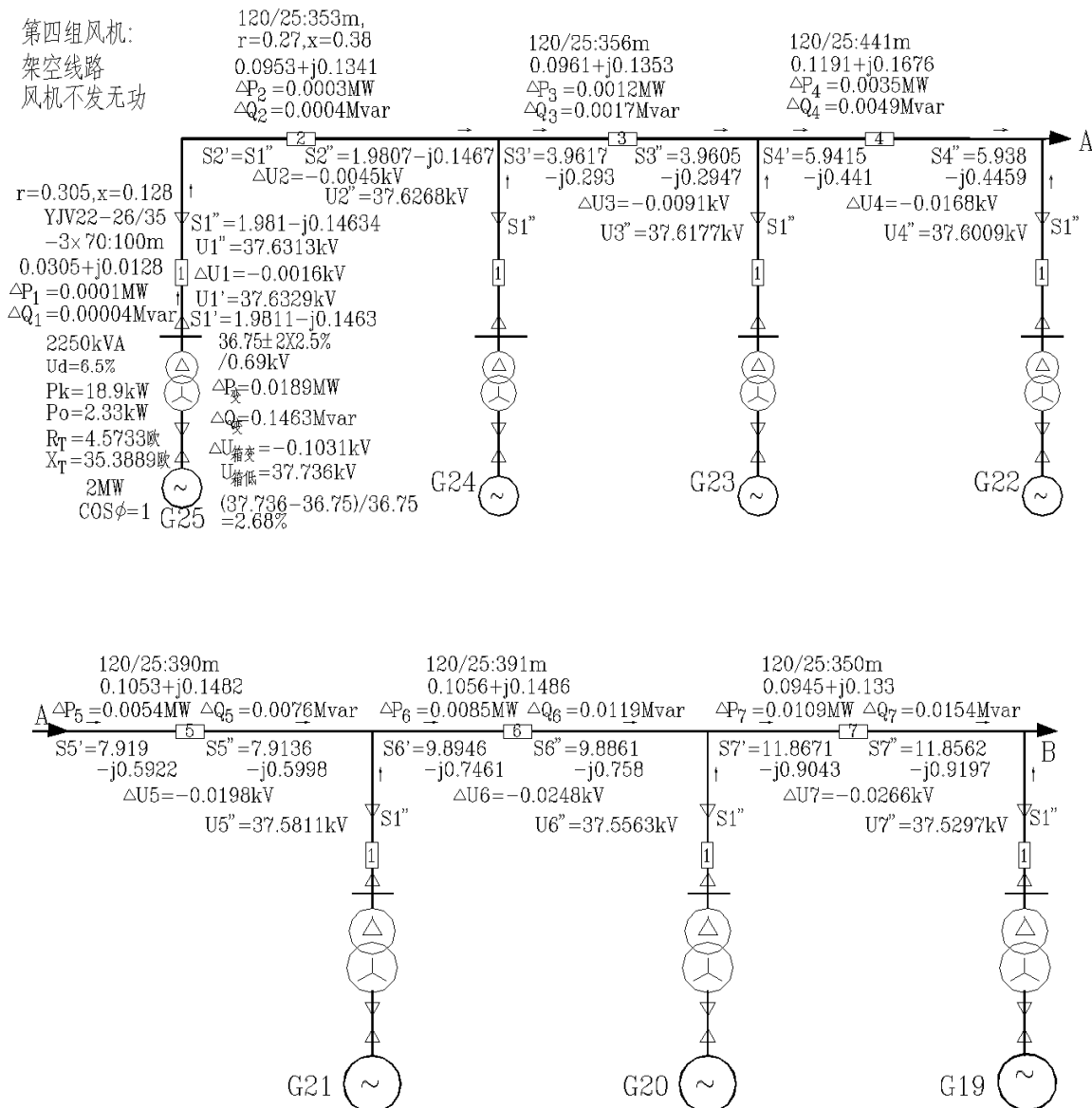
$$\Delta U_{15} = \frac{-P_{15}'' R_{15} + Q_{15}'' X_{15}}{U_{15}''} = \frac{-24.5936 \times 0.018 + 4.9029 \times 0.0208}{36.75} = -0.0093 \text{ kV}$$

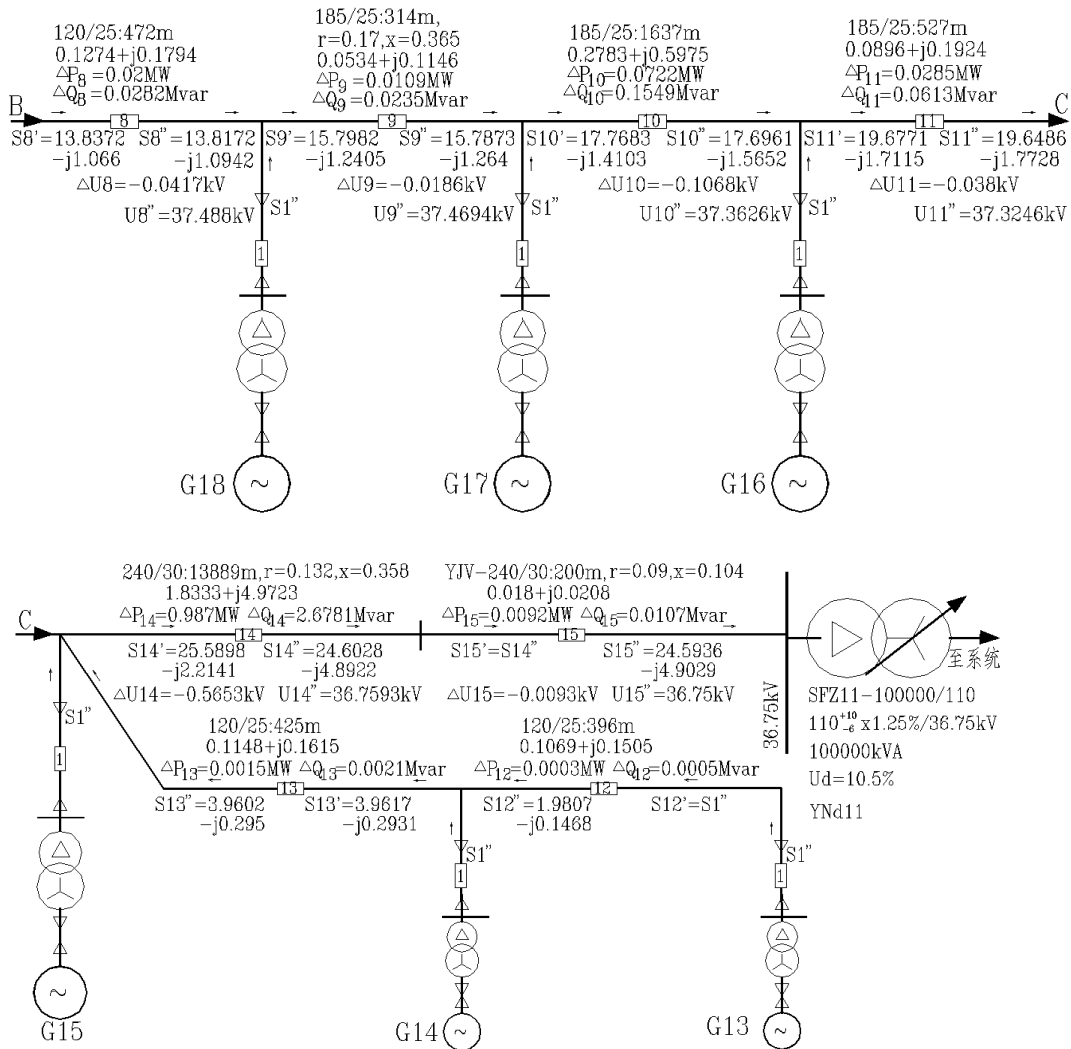
$$U_{14}'' = U_{15}'' - \Delta U_{15} = 36.75 - (-0.0093) = 36.7593$$

$$\Delta U_{14} = \frac{-P_{14}'' R_{14} + Q_{14}'' X_{14}}{U_{14}''} = \frac{-24.6028 \times 1.8333 + 4.8922 \times 4.9723}{36.7593} = -0.5653 \text{ kV}$$

$$U_{11}'' = U_{13}'' = U_{14}'' - \Delta U_{14} = 36.7593 - (-0.5653) = 37.3246$$

依此类推, 计算至最远线路始端及最远箱变低压侧。可见电压是从风机往升压站方向降落。全部计算结果标注于下图。

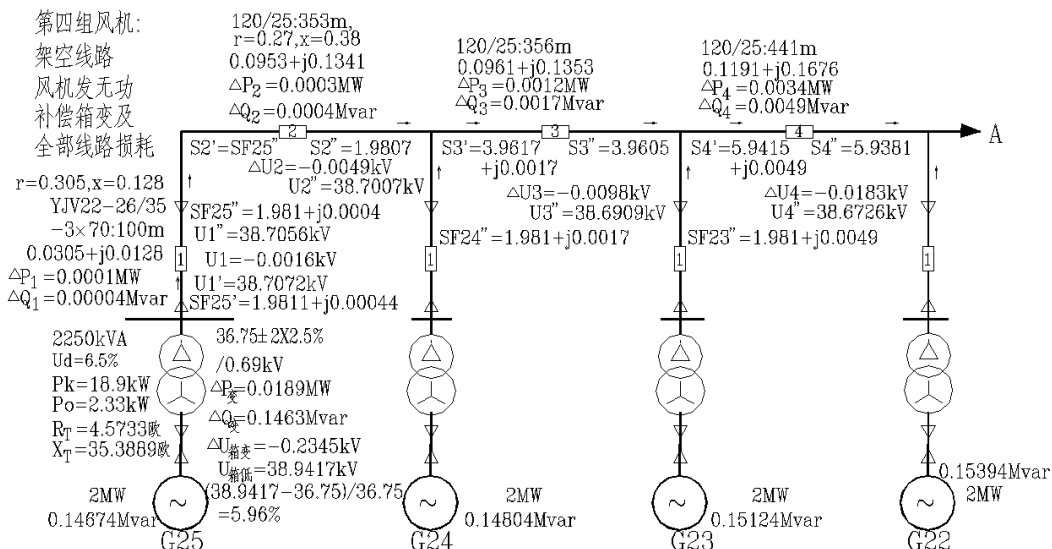


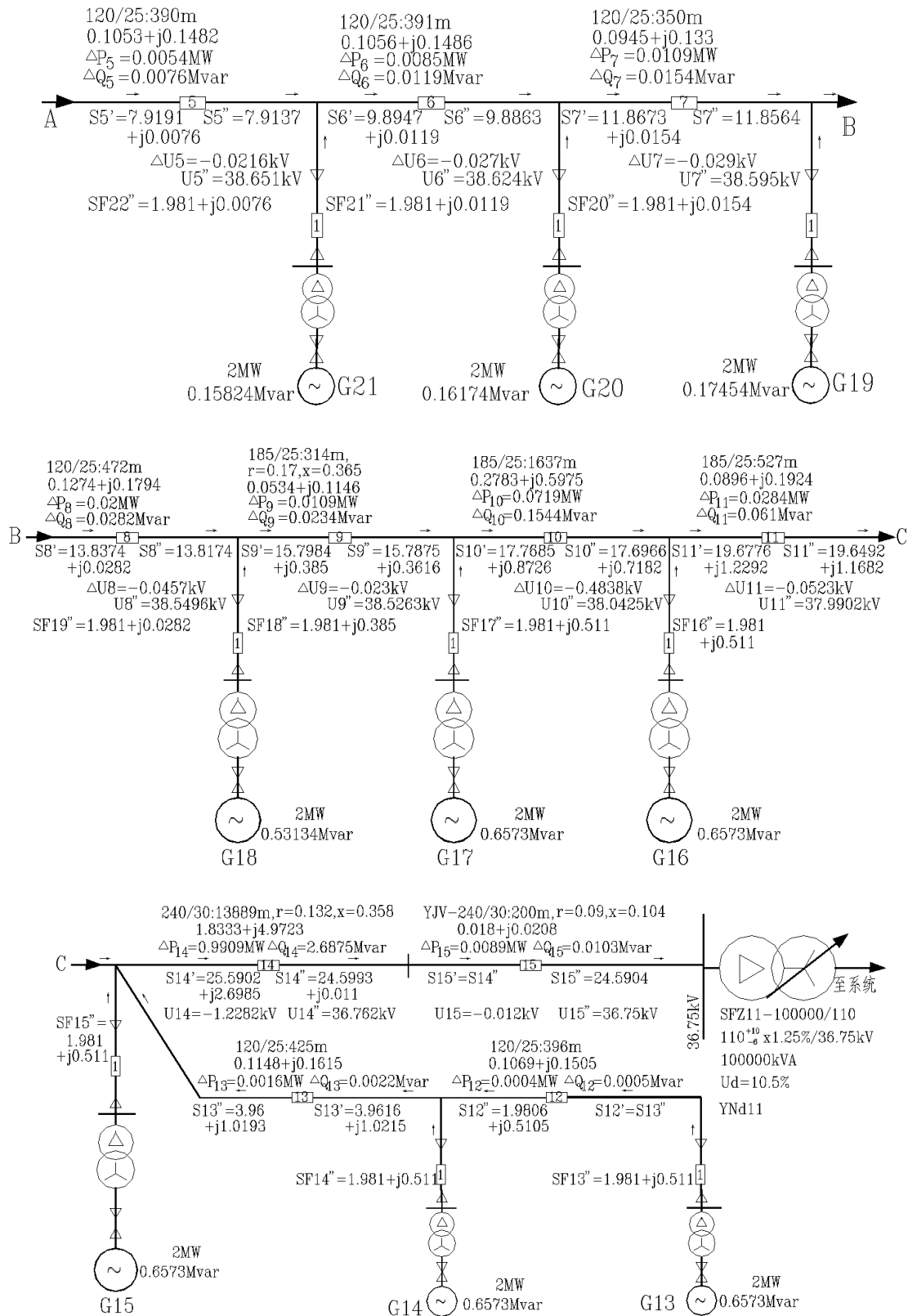


4.1 架空线路, 风机发无功补偿箱变及全部线路无功损耗后的计算

每台风机发适量无功补偿自身箱变及前段送出线路的无功损耗, 由于至升压站段线路过长, 一台风机所发无功不

能完全补偿, 因此由 G18~G13 风机共同多发无功补偿完全升压站段线路上的无功损耗。每台风机所发无功不一样。线路损耗及电压降落计算过程同 3.1, 计算结果见下图:





4.2 电缆线路, 风机不发无功时的损耗及电压降落计算  
 计算时考虑每段电缆的充电功率, 每个风机注入点功率包括了风机所连电缆线路充电功率的一半, 计算过程如下:

各箱变高压侧功率:  $S_f' = P - (\Delta P_f + j\Delta Q_f) = 2 - 0.189 - j0.1463 = 1.811 - j0.1463$ ,  
 电缆线路 2,3 充电功率的一半:  $0.5Q_{c2} = 0.5 \omega U_N^2 cL = 0.5 * 314 * 35^2 * 0.135 * 10^{-6} * 0.353 = 0.0092 \text{Mvar}$

$$0.5Q_{c3}=0.5\omega U_N^2cL=0.5*314*35^2*0.135*10^{-6}*0.356=0.0092\text{Mvar}$$

$$\text{架空线路2始端注入的功率: } S_2' = S_{P25}' = S_F' + j0.5Q_{c2} = 1.9811 - j0.1463 + j0.0092$$

$$= 1.9811 - j0.1371,$$

$$\text{电缆线路2上的电阻、电抗及有功无功损耗:}$$

$$R_2 + jX_2 = r * L + jx * L = 0.$$

$$405 * 0.353 + j0.126 * 0.353 = 0.143 + j0.0432,$$

$$\Delta P_2 = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_N^2} R = \frac{1.9811^2 + 0.1371^2}{35^2} \times 0.143 = 0.0005\text{MW}$$

$$\Delta Q_2 = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_N^2} X = \frac{1.9811^2 + 0.1371^2}{35^2} \times 0.0432 = 0.0001\text{Mvar}$$

$$\text{架空线2末端注入的功率 } S_2'' = S_2' - (\Delta P_2 + j\Delta Q_2)$$

$$= 1.9811 - j0.1371 - (0.0005 + j0.0001) = 1.9806 - j0.1372,$$

$$\text{风机G24节点注入的功率 } S_{P24}' = S_F' + j(0.5Q_{c2} + 0.5Q_{c3})$$

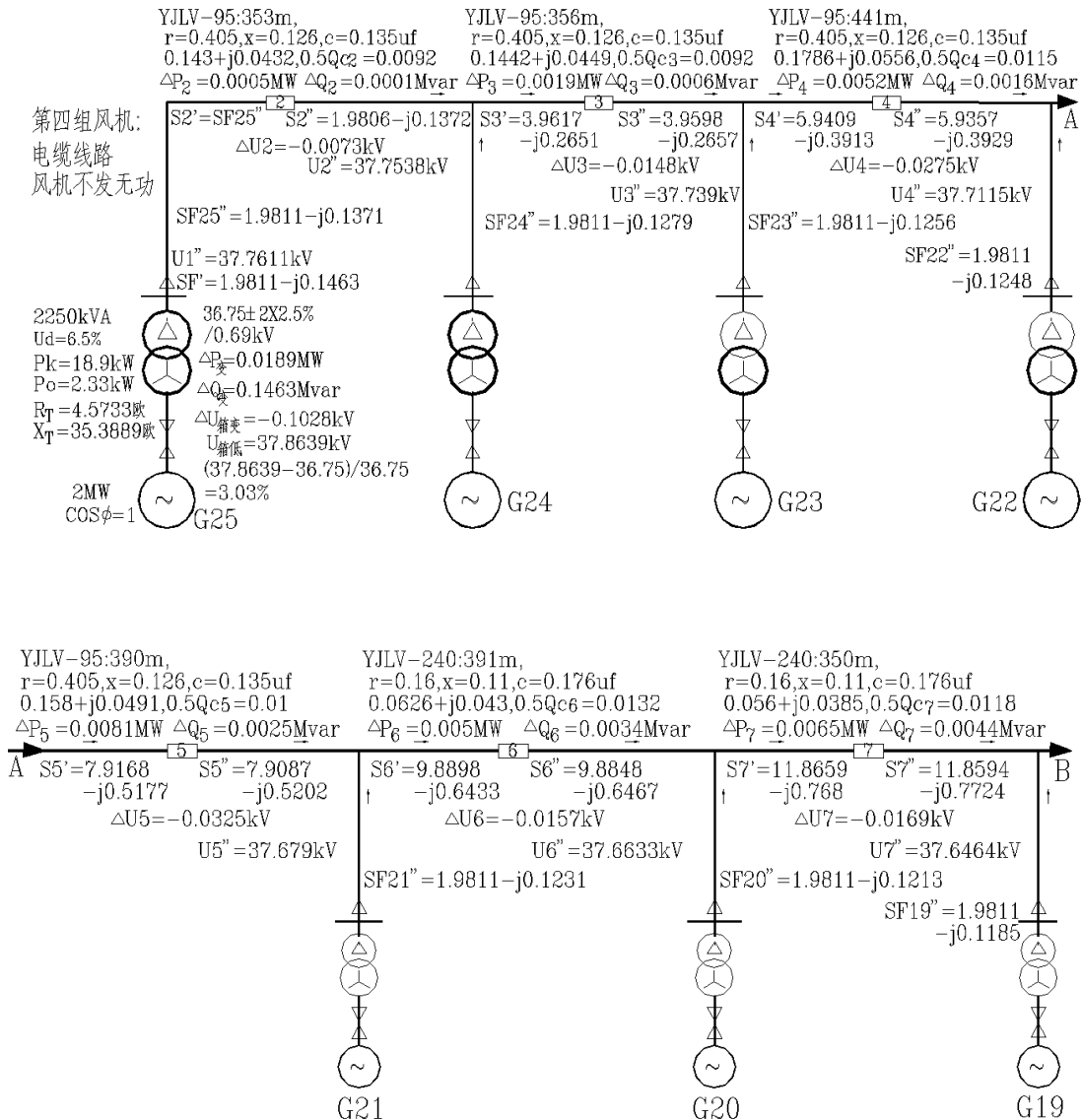
$$= 1.9811 - j0.1463 + j(0.0092 + 0.0092)$$

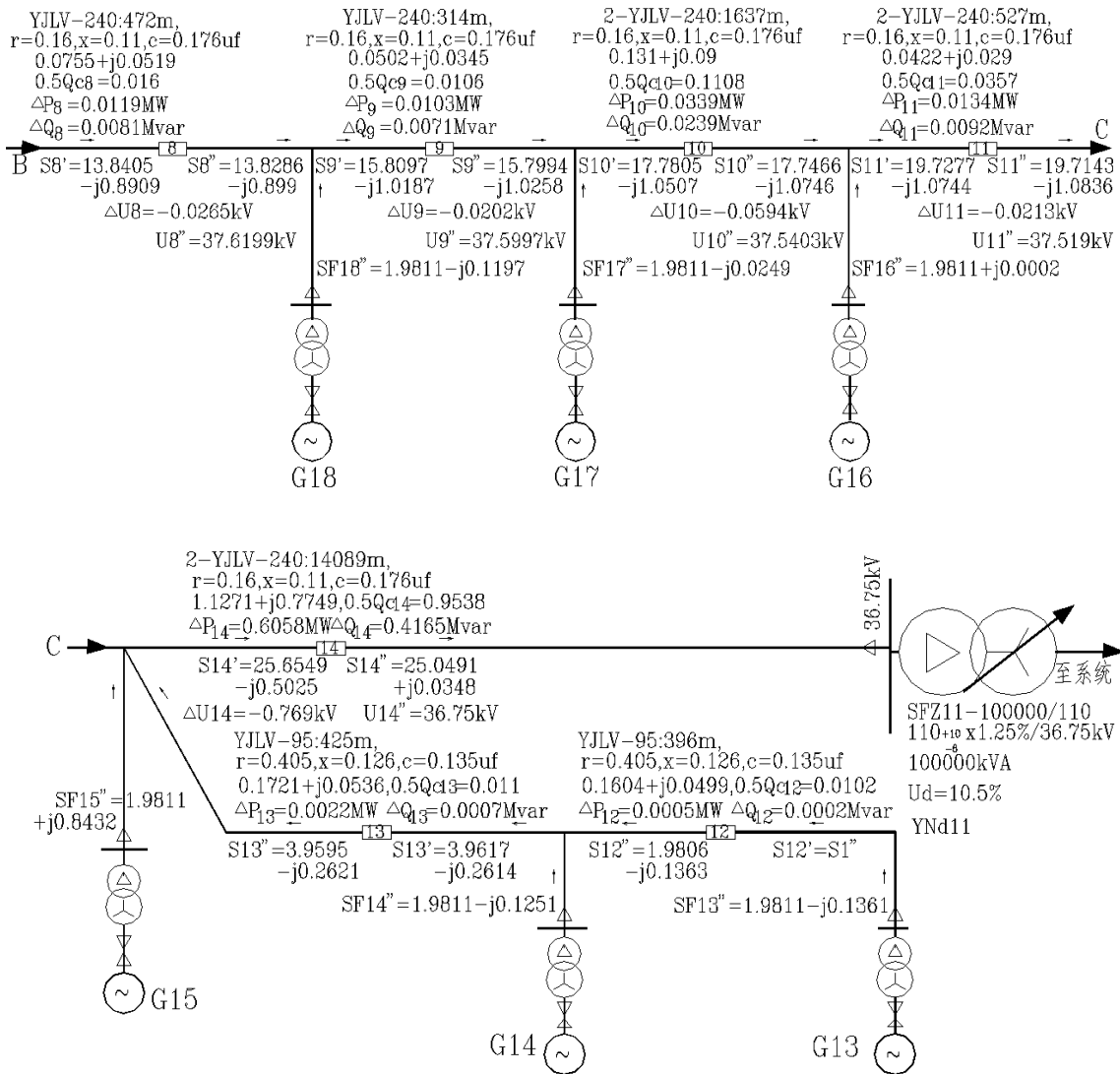
$$= 1.9811 - j0.1279,$$

$$\text{架空线3始端注入的功率 } S_3' = S_2'' + SF_{24}'$$

$$= 1.9806 - j0.1372 + 1.9811 - j0.1279 = 3.9617 - j0.2651,$$

依此类推,计算出各段电缆线路阻抗始端注入的功率、线路阻抗上损耗的有功无功、末端注入的功率,其中风机G15点注入的功率应为:  $G15'' = P - (\Delta P_{P7} + j\Delta Q_{Q7}) + 0.5Q_{c13} + 0.5Q_{c14}$ ,本计算中未计  $0.5Q_{c13}$ ,因这个数值很小,不影响计算结果。  $S_{14}'' = S_{14}' - (\Delta P_{14} + j\Delta Q_{14}) + 0.5Q_{c14}$  电压降落计算同3.1。全部计算结果标注于下图。





### 5 计算结果分析

#### 5.1 架空线路, 风机不发无功时的总损耗及总电压降落

线路上的  $\Delta P_{\text{总}1} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_{15} = 1.1595 \text{ MW}$ ,  
 线路上的  $\Delta Q_{\text{总}1} = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_{15} = 3.0012 \text{ Mvar}$ ,  
 算至箱变高压侧的电压降落  $(U_1' - 36.75) / 36.75 = (37.6329 - 36.75) / 36.75 = 2.4\%$

算至箱变低压侧的电压降落  $(U_{\text{箱低}} - 36.75) / 36.75 = (37.736 - 36.75) / 36.75 = 2.68\%$

#### 5.2 架空线路, 风机发无功补偿箱变及全部线路无功损耗的总损耗及总电压降落

线路上的  $\Delta P_{\text{总}2} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_{15} = 1.1628 \text{ MW}$ ,  
 线路上的  $\Delta Q_{\text{总}2} = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_{15} = 3.0094 \text{ Mvar}$ ,  
 算至箱变高压侧的电压降落  $(U_1' - 36.75) / 36.75 = (38.7072 - 36.75) / 36.75 = 5.33\%$

算至箱变低压侧的电压降落  $(U_{\text{箱低}} - 36.75) / 36.75 = (38.9417 - 36.75) / 36.75 = 5.96\%$

#### 5.3 电缆线路, 风机不发无功时的总损耗及总电压降落

线路上的  $\Delta P_{\text{总}3} = \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots + \Delta P_{15} = 0.7052 \text{ MW}$ ,

线路上的  $\Delta Q_{\text{总}3} = \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \dots + \Delta Q_{15} = 0.4783 \text{ Mvar}$ ,

算至箱变高压侧的电压降落  $(U_1' - 36.75) / 36.75 = (37.7611 - 36.75) / 36.75 = 2.75\%$

算至箱变低压侧的电压降落  $(U_{\text{箱低}} - 36.75) / 36.75 = (37.8639 - 36.75) / 36.75 = 3.03\%$

### 6 结论

可见, 在相同的阻抗下, 风机不发无功和风机发无功补偿箱变及全部线路无功损耗两种情况下, 线路上的有功、无功损耗差别不大,

$\Delta P_{\text{总}2} - \Delta P_{\text{总}1} = 1.1628 - 1.1595 = 0.0033 \text{ MW}$ ,  $\Delta Q_{\text{总}2} - \Delta Q_{\text{总}1} = 3.0094 - 3.0012 = 0.0082 \text{ Mvar}$ , 按每度电 0.6 元计算, 每天电费差仅为  $0.0033 * 1000 * 24 * 0.6 = 47.52$  元。

在相同的阻抗下, 风机不发无功时, 风机箱变及线路上消耗的无功由升压站往风机方向输送, 与有功是反方向, 从压降公式看  $\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$ , 分子即为  $-PR + QX$ , 对升压站与风机间的压降起减小作用, 由于  $-PR$  大于  $QX$  项, 因此风机侧电压高于升压站侧电压。风机发无功补偿箱变及全部线

路无功损耗后, QX 项等于 0 或同为负值, 升压站与风机间的压降显著增大, 由 2.4% 升高至 5.33%。无功变化对电压影响较大。

采用电缆线路时, 有功无功损耗显著减小, 是由于两根 YJLV22-3\*240 电缆并联的阻抗比 LGJ-185、LGJ-240 钢芯铝绞线的阻抗小较多造成的。实际工程中, 采用电缆线路时, 路径往往比架空线路长, 损耗不一定比架空线路小。采用电缆线路后, 由于电缆充电功率的影响, 充电功率减小了升压站向风机方向输送的无功, 对电压压降是增加的作用, 但同时由于两根 YJLV22-3\*240 电缆并联的阻抗比 LGJ-185、LGJ-240 钢芯铝绞线的阻抗小较多, 在阻抗上的电压降又会减小, 两者综合后, 采用电缆线路压降比采用架空线路压降从 2.75% 变为 2.4%, 还是略有增加。

从压降公式  $\Delta U = \frac{PR+QX}{U}$  看, 当风机不发无功时, 线路及

箱变上消耗的无功由升压站往风机方向输送, 与有功反向, 只按  $PR/U$  即  $1.732IR$  进行压降计算, 不考虑  $QX/U$  项, 也不考虑有功的损耗, 电压  $U$  取标准电压 35kV, 对压降计算结果均是增大的。压降在 5% 以内时可以按此方法进行计算。

最后一段集电线路上的压降超过 2.5% 时, 应将箱变的中间抽头按此压降进行调高, 但最高不能超过 38.5, 若超过, 可将升压站主变低压侧电压往下调低直至 35kV 为止。整个集电线路的压降应控制在 10% 以内。为了减少升压站与风机之间的电压降落, 建议风机尽量不发无功运行。

#### 参考文献:

[1] 电力工业部电力规划设计总院. 电气系统设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.