

风电场无功补偿装置容量配置研究

采用无功补偿技术是目前国内外解决风电并网电能质量问题的重要手段,分析了风电场无功补偿容量配置的各种影响因素和配置原则,对于设计规程要求不统一和影响送出线路无功损耗所占比重的因素等问题,通过分析计算进行了研究。给出了总补偿容量配置方法,以及动态补偿容量配置、电容器支路补偿容量与分组的建议。通过多个风电场案例计算验证了补偿容量配置方法的可行性。

杨超颖/国网山西省电力公司 王金浩 杜慧杰/国网山西电力科学研究院
刘思 黄浩/华北电力大学电气与电子工程学院



杨超颖/工程师

目前,对风电场无功补偿的研究越来越受到人们的关注。文献[1]总结了常见的风电场补偿形式,文献[2]介绍了风电场应用的并联电容器组,这种补偿方式投资少,控制和维护简单,但是调节不够灵活。文献[3]针对风力发电的特殊性,研究了维持风电系统稳定的动态无功补偿装置。文献[4]比较了将SVC、STATCOM接入风电场进行动态无功补偿的特性,验证了这两种装置对系统稳态和暂态性能的改善作用。

对于无功补偿容量的设计和配置,文献[5-7]对风电场无功补偿容量进行了原则性的规定及范围描述,文献[8]对风电场的无功容量选择进行了理论上的探讨。但上述文献对动态补偿容量配置和电容器支路容量与分组未进行详细讨论。文献[9]比较详细地分析了影响补偿容量的几种因素,但动态无功补偿装置容量的确定仅是均分了总补偿容量。文献[10]建立了不同风机、不同出力下的风

电场仿真模型,但是容量的选择和分配主要是根据仿真波形进行确定。

本文讨论了风电场内无功损耗产生原因,确定了一种风电场无功补偿容量计算的方法,提出了动态补偿容量配置、电容器支路补偿容量与分组的建议,并通过实际风电场案例验证了所给出方案的可行性。

风电场总无功补偿容量确定

1. 涉及风电无功补偿容量的相关标准分析

目前,有不少标准涉及风电场无功补偿容量的确定,文献[5]和文献[6]分别定性规定了计入补偿容量的内容。对于容性无功补偿容量,文献[6]补充了汇集线路和主变压器部分,但是对于箱式变压器部分,上述两个文献都没有说明。对于感性无功补偿容量,两者都是从充电功率角度进行了考虑,但是在计入内容以及多少百分比的送出线路充电功率问题上规定的不一致。

文献[7]对无功补偿容量进行了定量规定,规定了总补偿容量的大范围,即不小于装机容量的30%~50%,并且集中无功补偿容量不低于总补偿容量的40%~60%。文献[9]没有明确规定总容量所占百分比,但是详细规定了容性补偿装置容量不低于装机容量的25%,安装异步风机时不低于装机容量的50%,并且要求动态无功补偿至少为补偿容量的50%。但是,针对具体风电场选择多少,以及参考这两个文献得到的百分比值是否有矛盾,还需要进行详细计算分析。

关键词/Keywords

风力发电·
无功补偿装置·
动态补偿容量·
电容器支路·

山西电力科学研究院风电场动态电压控制技术研究及应用。

2. 风电场无功损耗主要影响因素

(1) 典型风电场参数

通常情况下，风电场主变压器将集电线路送来的电能升压后送出，常选用50 MV·A、100 MV·A、150 MV·A或240 MV·A的主变压器。同时，一台风机对应一台箱式变压器，将风机出口电压由690 V升到10 kV或35 kV，多选用1.6 MV·A或 0.8 MV·A的箱式变压器。

本文取典型风电场案例进行分析，采用1.5 MW双馈式机组，出口电压690 V，通过一机一变变压器的单元接线形式升至35 kV。取1.6 MV·A的箱式变压器，短路阻抗 $U_s\%$ 为6%，空载电流 $I_0\%$ 为0.8%。主变压器120 MV·A，短路阻抗 $U_s\%$ 为12%，空载电流 $I_0\%$ 按每100 MW容量安装一台变压器计算。风机电能经35 kV集电线路LGJ-240送入升压变电站。整个风场经单回220 kV输电线路LGJ-400接入电网。

(2) 主变压器无功损耗

主变压器的无功损耗主要分为空载损耗（不变损耗）和负荷损耗（可变损耗）两部分，可通过式（1）得到

$$\Delta Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_S (\frac{S^2}{S_N^2}) = \frac{I_0\%}{100} S_N + \frac{U_s\%}{100} (\frac{S^2}{S_N^2}) \quad (1)$$

式中， ΔQ_T 为变压器总无功损耗，kvar； ΔQ_0 为空载损耗，kvar； ΔQ_S 为负载损耗，kvar； S_N 为额定容量，kV·A； S 为视在功率，kV·A； $U_s\%$ 为短路阻抗百分数； $I_0\%$ 为空载电流百分数。

目前，我国风电场多采用分期投建，一般49.5 MW为一期接入一台主变压器，因此以50 MW为间隔给出了随装机容量增大主变压器无功损耗的变化。

(3) 箱式变压器无功损耗

箱式变压器的无功损耗也分为两部分，可以通过式（1）进行计算。由一机一箱式变压器的原则，每50 MW装机容量一般需要接入33台箱式变压器。

(4) 集电线路无功损耗

集电线路的无功损耗由线路等效电抗消耗的无功功率和对地等效电纳发出的无功功率（充电功率）两部分组成，如式（2）所示

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta Q_L + \Delta Q_B = (P_1^2 + Q_1^2) \frac{X}{U_1^2} - (U_1^2 + U_2^2) \frac{B}{2} \\ &= 3I^2 X - (U_1^2 + U_2^2) \frac{B}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中， ΔQ 为集电线路总无功损耗，kvar； ΔQ_L 为感性无功损耗，kvar； ΔQ_B 为充电功率，kvar； X 为电抗， Ω ； B 为等效电纳，S； P_1 为线路上的有功功率，kvar； Q_1 为无功功率，kvar； I 为电流，A； U_1 为始端电压，kV； U_2 为末端电压，kV。

典型风电场设计中，每50 MW装机容量一般经3回集电线路接入，计算中假设11台风机均匀分布在每回集电线路上，表1为随装机容量增大上述无功损耗的变化。

表1 装机容量与不同部分损耗

装机容量 /MW	主变压器损耗 /Mvar	箱式变压器损耗 /Mvar	集电线路损耗 /Mvar
50	4.0	3.59	2.07
100	11.2	7.18	4.14
150	14.9	10.77	6.21
200	22.4	14.36	8.28
250	26.1	17.95	10.35
300	33.6	21.54	12.42
350	37.3	25.13	14.49
400	44.8	28.72	16.56
450	48.5	32.31	18.63
500	56.0	35.90	20.70

(5) 送出线路无功损耗

风电场内主变压器、箱式变压器和集电线路无功损耗是需要全部补偿的，但是对于送出线路的无功损耗需要补偿多少，还需要结合风电场具体情况确定。送出线路无功功率分两部分进行考虑，可通过式（2）计算，其中感性无功要计入容性补偿容量，充电功率要计入动态无功补偿容量。

对于单一风电场，送出线路感性无功损耗主要和风电场装机容量与线路长度有关，如果按照补偿送出线路无功损耗的1/2计算无功容量^[6]，表2为不同情况下送出线路感性无功损耗的计算结果。

对于充电功率部分如上文，作为动态无功补偿装置选择的必要依据。

通过对上述几方面进行分析，可以基本确定

表2 送出线路感性无功损耗

装机/MW	送出线路感性无功损耗/Mvar					
	10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km
50	0.11	0.21	0.32	0.42	0.53	0.63
100	0.42	0.84	1.27	1.69	2.11	2.53
150	0.95	1.90	2.85	3.80	4.75	5.70
200	1.69	3.38	5.07	6.76	8.44	10.13
250	2.64	5.28	7.92	10.56	13.19	15.83
300	3.80	7.60	11.40	15.20	19.00	22.80
350	5.17	10.34	15.52	20.69	25.86	31.03
400	6.76	13.51	20.27	27.02	33.78	40.53
450	8.55	17.10	25.65	34.20	42.75	51.30
500	10.56	21.11	31.67	42.22	52.78	63.33

总无功损耗如图1所示。

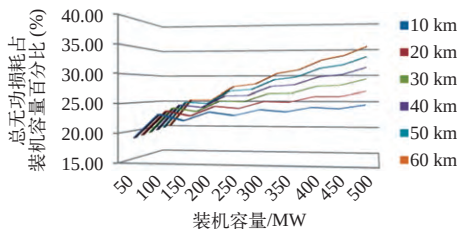


图1 总无功损耗所占百分比

通过图1结果可以看出，随着风电场装机容量和线路长度的变化，总无功损耗所占比例不一且变化较大，所以要根据具体风电场情况进行无功补偿容量计算。

此外，随着风力发电技术的提高，风机一般可按不吸收无功功率考虑。当需要补充考虑风电机组吸收的无功功率时，可根据不同类型的机组增加总无功补偿容量。对于恒频恒速机组，可以增加总装机容量30%的无功补偿容量；对于恒频变速机组，可以增加总装机容量10%~20%的无功补偿容量；对于直驱永磁同步机组，可以不增加^[2]；对于机组混装方式，可按不同类型风机需要增加的百分比乘以其所占权重加总得到。

动态补偿支路及电容器支路配置方案

总无功补偿容量确定后，还要根据各种补偿设备特点选择配置方案，以实现补偿设备与风电场相适应、相协调。由于风电场无功损耗主要为容性无功，所以上述各部分无功损耗总和即取为

所需补偿的总容性无功，动态无功补偿容量单独计算得出。

1. 动态无功补偿装置配置

目前，应用较普遍的风电场动态无功补偿装置主要是SVC和STATCOM。动态无功补偿装置配置时主要考虑两方面作用：①和电容器支路配合，以便线性调节无功功率，考虑到文献[8-9]的规定和无功补偿装置调节能力，建议动态补偿容量不低于总补偿容量的40%；②补偿风电场内部充电功率和送出线路充电功率。可对不同装机容量（50~500 MW）、不同送出线路长度（10~60 km）计算出计及风电场内部和送出线路充电功率的总充电功率如表3所示，其占装机容量百分比例如图2所示。

表3 总充电功率损耗

装机/MW	总充电功率/Mvar					
	10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km
50	3.35	5.13	6.92	8.71	10.49	12.28
100	4.91	6.69	8.48	10.27	12.05	13.84
150	6.47	8.25	10.04	11.83	13.61	15.40
200	8.03	9.81	11.60	13.39	15.17	16.96
250	9.59	11.37	13.16	14.95	16.73	18.52
300	11.15	12.93	14.72	16.51	18.29	20.08
350	12.71	14.49	16.28	18.07	19.85	21.64
400	14.27	16.05	17.84	19.63	21.41	23.20
450	15.83	17.61	19.40	21.19	22.97	24.76
500	17.39	19.18	20.96	22.75	24.53	26.32

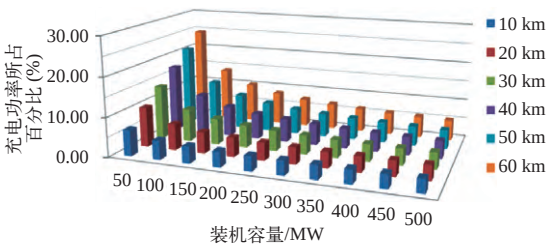


图2 总充电功率损耗占装机容量百分比

由表3和图2可以看出，总充电功率随装机容量和送出线路长度增加而增加，其中送出线路长度影响较大，因为装机容量主要影响风电场内部充电功率，而这部分充电功率变动幅度不大。虽然总充电功率增加了，但随着装机容量的变大，其所占比例逐渐减小。在装机容量小于等于50 MW且

送出线路长度大于等于20 km, 装机容量小于等于100 MW且送出线路长度大于等于40 km, 装机容量小于等于150 MW且送出线路长度大于等于50 km这几种情况时, 总充电功率所占比重较大。

综合这两方面因素, 建议动态补偿装置容量不低于总补偿容量的40%。但在中小容量, 较长线路(如上述几种所占比重较大情况)时, 总充电功率很可能超过总补偿容量的40%, 这时需进行详细的总充电功率计算, 作为动态装置选择的必要依据。

同时, 由于风力发电的波动性和不稳定性, 风电场还存在不同程度的谐波、电压闪变、波动和负序等问题^[11], 所以动态无功补偿容量确定还可考虑以下因素。

(1) 补偿电压闪变

由于风机出力的波动, 会引起电压闪变问题。对于单个机组这个问题可能会不突出, 但是随着大容量风电机组的集中接入, 可能要放大这种影响。

连续运行状态下, 多台风电机组闪变计算式为

$$P_{\text{fl}\Sigma} = \frac{1}{S_D} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{out}}} [c_i(\Psi_k, v_a) S_{n,i}]^2} \quad (3)$$

式中, $c_i(\Psi_k, v_a)$ 为单台机组的闪变系数; $S_{n,i}$ 为单台机组的视在功率, Mvar; S_D 为风电场出口母线处短路容量, Mvar; N_{out} 为并联运行机组的数量。

风电场内多台机组切换操作所产生的总闪变可由下式计算得到

$$P_{\text{fl}\Sigma} = \frac{8}{S_D} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{\text{out}}} N_{120,i} [k_{f,i}(\Psi_k) S_{n,i}]^{3.2} \right\}^{0.31} \quad (4)$$

式中, $N_{120,i}$ 和 $k_{f,i}(\Psi_k)$ 分别为各台机组120 min内切换运行次数和单台机组的闪变阶跃系数。

假设动态补偿装置的补偿率为 $C(\%)$, 则

$$C = Q_D / \Delta Q_{\text{max}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, Q_D 为动态补偿装置的容量, Mvar; ΔQ_{max} 为波动性负荷最大无功功率变动量, Mvar。

由上式确定 C 与 ΔQ_{max} 后, 即可求出 Q_D ^[12]。

(2) 补偿电压波动问题

限制风机同时启动或停机台数引起的电压波动可通过下式计算

$$d' \approx \frac{\Delta S_i}{S_{\text{sc}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, ΔS_i 为三相负荷的变化量, $\text{MV} \cdot \text{A}$; S_{sc} 为PCC点在正常较小方式下的短路容量, $\text{MV} \cdot \text{A}$ 。

从 d' 补偿到国标限值 d 所需要的动态补偿装置容量为

$$Q_D = (d' - d) S_D \quad (7)$$

因此, 在风电场动态无功补偿装置配置时, 要考虑和电容器支路配合、充电功率、电压闪变和电压波动等影响因素, 取其中最大值为风电场动态无功补偿装置容量。

2. 电容器支路配置

对于配置SVC的情况, 电容器支路总容量为上文确定的无功损耗总容量, 对于配置STATCOM的情况, 电容器支路总容量为上文确定的无功损耗总容量减去动态装置部分的容性无功容量。电容器支路总容量确定后, 需要对其进行再分配, 即对并联电容器进行分组^[13]。

根据文献[13]中规定, 无功补偿装置最大单组容量为: 10 kV电压等级的不大于8 Mvar; 35 kV电压等级的不大于12 Mvar; 110(66) kV电压等级的不大于20 Mvar。

由于风电场中电容器支路多接于35 kV母线处, 单台容量应不超过12 Mvar。单台电容器容量不宜过大, 同时从风电场电压无功控制灵活性考虑, 应有一定的分组; 但分组过多会增加投资, 并且可能使电容器出现较频繁投切情况, 为此分组也不宜过多。综合以上方面, 可以分为以下几类情况确定电容器分组。

- 1) 当总容量小于等于12 Mvar时, 分1~2组。
- 2) 当总容量大于12 Mvar小于等于40 Mvar时, 分2~4组。
- 3) 当总容量更大时, 可分多组。

根据风电场实际情况, 按等容量进行分组。

为了减小涌流或抑制谐波, 电容器支路一般还要串联电抗器, 串联电抗器的额定电抗率是根据系统谐波水平而定的。一般风电场中5次、7次谐波的干扰最为严重, 谐波电流最大, 串联电抗率可考虑在4.5%~6%之间选择; 对于存在3次谐波

较突出的风电场，可考虑串12%电抗率的电抗。

实际风电场无功补偿容量配置分析

以7个风电场为例进行无功补偿容量配置计算分析，各风电场相关参数如表4~表6所示。

表4 变压器参数

名称	主变压器型号	台数	箱式变压器型号	台数
案例1	SZ 10—50000/110	1	S11—1600/35	33
案例2	SFZ10—50000/220	1	S10—1600/35	33
案例3	SZ 11—150000/220	1	S9—1600/35	66
案例4	SFZ 11—50000/110	2	YBM—40.5/0.69—1600	66
案例5	SZ 11—150000/220	1	S11—1600/35	100
案例6	SZ 11—150000/220	1	S11—2500/35	60
案例7	SFSZ11—120000/220	3	S11—1600/35	200

表5 线路参数

名称	集电线	长度/km	送出线	长度/km
案例1	LGJ—240	15	LGJ—185	20
案例2	LGJ—150	18	LGJ—400	21
案例3	LGJ—150	34	LGJ—400	37
案例4	LGJ—150	36	JL/G1A—300/40	34
案例5	LGJ—120	35	LGJ—240×2	27
案例6	LGJ—240	32	LGJ—400	36
案例7	LGJ—120	61	LGJ—400×2	32

表6 风电场情况

名称	装机	动态补偿支路	电容支路	调节范围
/Mvar	/MW		/Mvar	
案例1	49.5	1×10 Mvar TCR	1×10	-10~+10
案例2	49.5	1×10 Mvar MCR	1×10	-10~+10
案例3	99	1×10 Mvar STATCOM	2×10	-10~+30
案例4	99	3×6 Mvar STATCOM	2×6	-18~+30
案例5	150	1×10 Mvar TCR	3×12.5	-10~+37.5
案例6	150	2×10 Mvar STATCOM	4×5	-20~+40
案例7	300	3×20 Mvar STATCOM	—	-60~+60

按上文方法计算无功损耗，其中案例1和案例2由于是小容量且是一期建设风电场，上级变电站也没有其他风电场线路接入，无功补偿容量充足，所以送出线路的无功损耗可以不用计入。各案例的计算结果如表7所示。

为了进一步验证计算方法的合理性，取案例2风电场为例进行仿真分析，该系统接线图如图3所示，风速可以设定从5~14 m/s变化。

表7 各部分无功损耗

名称	主变压器 /Mvar	箱式变压器 /Mvar	集电线 /Mvar	送出线 /Mvar	总损耗 /Mvar
案例1	5.55	3.32	1.16	—	10.03
案例2	6.23	3.10	1.55	—	10.88
案例3	10.83	7.92	3.01	3.59	25.35
案例4	12.50	8.03	3.09	5.59	29.21
案例5	22.50	9.56	2.94	1.83	36.83
案例6	22.50	10.28	2.80	3.49	39.07
案例7	30.63	19.11	5.10	9.13	63.97

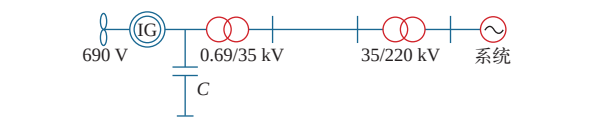


图3 案例二系统接线图

如图4所示，以风速14 m/s为例，主变压器35 kV侧的线电压有效值为36.34 kV，相电流有效值为0.79 kA，符合系统运行情况。

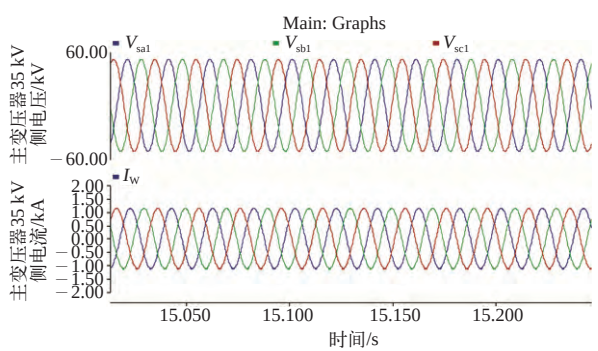


图4 风速14 m/s时的35 kV侧电压、电流波形

根据仿真数据，统计不同风速扰动下，案例2风场需要的无功补偿容量，如表8所示。

表8 不同风速扰动下风电场无功需求

风速/ m/s	有功输出/MW	吸收无功/Mvar
5	8.61	0.42
6	14.49	1.05
7	23.13	2.41
8	34.23	5.06
9	48.33	9.92
10	49.69	10.48
11	49.69	10.49
12	49.69	10.49
13	49.69	10.49
14	49.69	10.53

在不同风速下，案例2风场需要的无功容量为0.42~10.53 Mvar，对比理论计算结果和仿真结果可以看出，即使在风机出力最大情况下，按照计算所得的容量也可以满足风电场无功需求，进一步验证了无功容量配置方法的正确性。

对比多个风场无功容量计算值和无功补偿装置安装容量如表9所示。

表9 风电场无功容量对比情况

名称	计算值 /Mvar	计算值取整 /Mvar	容性无功安装量 /Mvar	感性无功安装量 /Mvar
案例1	10.03	11	10	10
案例2	10.88	11	10	10
案例3	25.35	26	30	10
案例4	29.21	30	30	18
案例5	36.83	37	37.5	10
案例6	39.07	40	40	20
案例7	63.97	64	60	60

将无功容量计算值取整后与实际无功安装容量进行对比，通过表9中数据可以看出，依据所提出配置方法计算的无功补偿容量可以满足实际风电场无功补偿需求。案例1和案例2比安装容量略大，有可能是实际安装容量时考虑到一般不会出现最大无功补偿需求，所以选取了整数值，随着小容量风场继续扩大规模，建议这两个风电场在建设二期时留有足够的无功补偿容量。同时，对比表6，考虑电容器支路配置方案，这两个案例可以采用2组5 Mvar电容器支路配合1台5 Mvar TCR/MCR方式，这样既满足了动态支路和电容器支路配合调节问题，又节省了5 Mvar的动态支路容量。

案例3是用容量150 MV·A的主变压器带99 MW的风电机组，此时这部分需要补偿的无功较小，如果继续接入风机，满载时总无功损耗约在35 Mvar左右，实际无功补偿装置安装容量很好地为后期建设留有了裕量。

案例5由于特别选取了单台容量为12.5 Mvar的补偿设备，所以实际安装容量略大。

案例6容量满足要求，但是针对具体支路配置方案，也可遵循上文的相关分析，采用与表6中配置方式不同的方案，如采用3组8 Mvar电容器支路与2台8 Mvar STATCOM相配合的补偿方案。此时

可以满足动态装置选择条件，同时又减小了电容器支路数和动态装置投资。

案例7实际安装容量略小，建议增加无功补偿容量数值。

对于动态无功补偿支路，补偿充电功率的感性无功容量均是充足的，但是作为风电场动态电压调整装置，案例3、案例5可以再增加一些，建议占总补偿容量的40%，这样有利于增强无功补偿装置调节电压变动和抑制电压闪变的能力。同时，还需要结合风电场实际情况对选定的动态无功补偿容量做校验，以保证风电场电能质量指标不超过标准限值。

结束语

本文首先分析了风电场无功补偿容量配置需要考虑的各种因素，包括主变压器、箱式变压器、集电线路、送出线路、风机以及电能质量影响等，给出了一种风电场无功补偿容量计算方法。同时，给出了动态补偿容量配置、电容器支路补偿容量与分组的建议，动态补偿容量确定时需要根据具体情况灵活选择计入内容及比例。对于动态补偿装置和电容器支路的多种配置方案，要从满足容量补偿需求、调整灵活性及经济性方面进行选择。最后，对实际风电场无功补偿容量配置情况进行分析，并给出容量配置的建议。

参考文献

[1] 拜润卿, 秦睿, 智勇, 等. 风电基地动态无功补偿装置参数实测与分析 [J]. 中国电力, 2012, 45 (2): 54-57.

[2] 石巍, 张彦昌, 等. 风电场无功补偿容量设计与补偿方式研究 [J]. 电力勘测设计, 2011, 6 (3): 76-80.

[3] 于阳. 基于自抗扰控制策略的SVC在风电系统中的应用研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2012.

[4] 顾威, 李兴源, 魏巍. 用SVC和STATCOM改善风力发电动态性的仿真比较 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25 (11): 70-75.

(下转第105页)

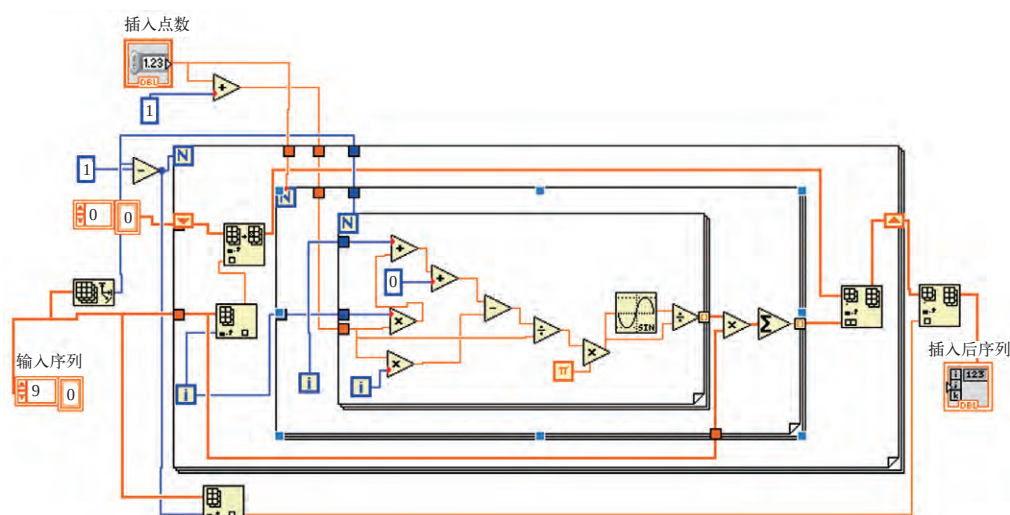


图9 LabVIEW正弦插值程序

参考文献

- [1] 曾庆辉, 刘晓华, 麦洪. 电能质量在线监测系统的数据分析与应用[J]. 电气应用, 2012, 31(6): 26-30.
- [2] 何早红. 电力网中的谐波及其抑制技术[J]. 电气应用, 2005, 24(6): 65-67.
- [3] GB/T 15543—2008 电能质量三相不平衡[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 薛蕙, 杨仁刚. 基于FFT的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 106-111.
- [5] 柴建中. 基于LabVIEW的电能质量分析及监测装置的设计与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [6] 赵刚, 施围, 林海雪. 闪变值计算方法的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 15-18.
- [7] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [8] 贾秀芳, 赵成勇, 胥国毅, 等. IEC闪变仪误差分析及改进设计[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 121-126.
- [9] 马玉龙, 刘连光, 张建华. IEC闪变测量原理的数字化实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 92-95.
- [10] 杨乐平, 李海涛. LabVIEW高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(收稿日期: 2014-07-29) EA

(上接第99页)

- [5] Q/GDW 392—2009 风电场接入电网技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [7] Q/GDW 212—2008 电力系统无功补偿配置技术原则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [8] 张强, 仇卫东. 风电场内集中无功补偿容量的设计与研究[J]. 中国电力, 2012, 45(9): 25-28.
- [9] 王凯, 谈英莲. 风电场最佳动态无功补偿容量的选择[J]. 电机技术, 2012(5): 28-30.
- [10] 张永武, 孙爱民, 张源超, 等. 风电场无功补偿容量配置及优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 150-156.
- [11] 姚骏, 陈西寅, 廖勇, 等. 抑制负序和谐波电流的永磁直驱风电系统并网控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 29-35.
- [12] 刘思, 徐永海, 王金浩, 等. 静止无功补偿器容量确定及补偿性能改善方法研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(9): 1-5.
- [13] Q/GDW 212—2008 电力系统无功补偿配置技术原则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

(收稿日期: 2014-09-01) EA