

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ В СОВМЕЩЕННОЙ СИСТЕМЕ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Бекиров Эскандер, Стрижаков Кирилл.

Национальная академия природоохранного и курортного строительства.
Адрес: Украина, 95493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181. e-mail: www.napks.edu.ua

Аннотация. В работе рассматривается возможность оптимизации режимов работы солнечной электростанции и тепловой электростанции. Произведены расчеты и проведен анализ когда в системе электроснабжения происходит генерация электрической энергии от солнечной электростанции и рассчитана экономия традиционных ресурсов возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: оптимизация, электрические станции, расход топлива, мощность, возобновляемая энергетика, солнечная электростанция.

ВВЕДЕНИЕ

Использование возобновляемой энергетики предопределено благоприятными климатическими условиями. Строительство и ввод в эксплуатацию солнечных электростанций (СЭС) в Крыму позволяет в значительной мере уменьшать энергодефицит на Крымском полуострове. Родниковая солнечная электростанция г. Симферополь генерирует электрическую энергию практически в течении всего года: в зимнее время генерация электроэнергии в энергосистему продолжается в течении 8 часов – с 10⁰⁰ до 18⁰⁰, а в летнее время в течение 14-15 часов с 5⁰⁰ и до 19 часов. Генерация происходит в течении дневного времени, а потребление электрической энергии нагрузками осуществляется в течении практически суток, то есть и в ночное время. В ночное время солнечная электростанция не генерирует электрическую энергию, потребители используют электроэнергию, потребители используют электроэнергию из энергосистемы, в которую генерируют другие источники энергии. Моментально, как только прекращается генерация СЭС электроэнергии другие генерирующие устройства не могут включаться, так как для ГЭС, так и для ТЭС необходимо время включения и ввода технологического режима.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В данной работе рассматривается оптимизация режимов распределения нагрузки в совмещенной системе — солнечная электростанция (СЭС) и тепловая электростанция (ТЭС). Для режимов поставленной задачи рассмотрим распределение активных нагрузок между электрическими станциями энергосистемы с учетом потерь активной мощности в электрической сети.

Допустим, что в системе имеется одна эквивалентная теплоэлектростанция (ТЭС) и $j = б, в \dots, г$ солнечных электростанций (СЭС). Каждая СЭС за

период $\Delta\phi$ может выработать определенное количество энергии в зависимости от солнечного сияния.

Рассмотрим задачу, которая заключается в том, чтобы в каждом расчетном интервале всего периода $\Delta\phi$ получить наивыгоднейшее распределение нагрузки между станциями.

1. Уравнение цели

$$B = \sum_{t=1}^{t=k} B_t \cdot \Delta\phi_t \Rightarrow \min,$$

где B_t — расход топлива на ТЭС

Расход топлива эквивалентной тепловой станции зависит от того, с какой мощностью она будет работать в каждом расчетном интервале времени $t=1,2,\dots,k$, а следовательно, от мощности СЭС.

2. Уравнение связи — это расходная энергетическая характеристика эквивалентной ТЭС $B(P_{ТЭС})$ и расходные энергетические характеристики каждой СЭС

3. Уравнение ограничений.

Для каждого расчетного интервала имеется балансовое уравнение мощности (всего k уравнений)

$$P_{\text{бэлт}} = P_t - (P_{\text{мэс,т}} + P_{\text{б,т}} + P_{\text{в,т}} + \dots + P_{\text{г,т}}) + P_{\text{ном,т}} = 0,$$

где $P_t = P_1, P_2 \dots$ — нагрузки системы в интервале $t=1,2,\dots,k$;

$P_{\text{мэс}}$ — мощность ТЭС;

$P_{\text{б,т}}, P_{\text{в,т}}, P_{\text{г,т}}$ — мощности СЭС;

$P_{\text{ном,т}}$ — потери активной мощности в сети.

Уравнение мощности для солнечной электростанции

$$P_j = \sum_{t=1}^{t=k} I_{j,t} \cdot A \cdot \Delta\phi_t, \quad (3)$$

где $I_{j,t}$ — интенсивность солнечного сияния;

A — площадь СЭС.

4. Уравнение оптимизации имеет вид

$$\frac{b}{1 - \sigma_{ТЭС}} = \frac{i}{1 - \sigma_i}$$

где $b = \frac{\partial B_{ТЭС}}{\partial P_{ТЭС}}$ — относительный прирост расхода топлива тепловой станции;

$i = \frac{\partial I_j}{\partial P_i}$ — относительный прирост солнечной радиации на СЭС

$\sigma_{ТЭС} = \frac{\partial p}{\partial P_{ТЭС}}$, $\sigma_i = \frac{\partial p}{\partial P_i}$ — относительные приросты потерь активной мощности в электрических сетях при изменениях мощностей ТЭС и СЭС соответственно.

Вывод уравнения оптимизации. Если требуется найти систему функций, реализующую максимум или минимум, подчиняющуюся достаточно гладким дополнительным условиям или уравнениям связи, искомую систему функций получаем в виде решения системы дифференциальных уравнений (уравнений Эйлера). Применим необходимое условие максимума или минимума функции при ограничениях параметров и воспользуемся методом множителей Лагранжа. Функция Лагранжа включает в себя формулы и имеет вид:

$$\Phi = \sum_{t=1}^{t=k} B_t + \sum_{t=1}^{t=k} \lambda_t P_{балан,t} + \sum_{j=1}^{j=r} \lambda_j P_j$$

где λ — множитель Лагранжа.

Неизвестными величинами будут мощности ТЭС и j СЭС в каждом расчетном t -м расчетном интервале времени, всего $jt+t$ неизвестных мощностей. Неизвестны также множители Лагранжа t множителей λ_t и j множителей λ . Итак число неизвестных равно $jt+2t+j$. Чтобы решить задачу, необходимо составить $jt+2t+j$ уравнений.

При решении этих уравнений можно определить $jt+t$ неизвестных. Уравнение мощностей СЭС дают j уравнений, а балансовое уравнение мощности — t уравнений. Таким образом, число уравнений достаточно для определения неизвестных.

Производные по мощности ТЭС имеют вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_{ТЭС,t}} = \frac{\partial B_t}{\partial P_{ТЭС,t}} + \lambda_t \left(1 - \frac{\partial p_t}{\partial P_{ТЭС,t}} \right) = 0$$

Из данного уравнения:

$$-\lambda_1 = \frac{b_1}{1 - \sigma_{ТЭС1}}; \quad -\lambda_2 = \frac{b_2}{1 - \sigma_{ТЭС2}}; \quad \dots; \quad -\lambda_k = \frac{b_k}{1 - \sigma_{ТЭСk}}$$

Производные по мощности СЭС имеют вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_{j,t}} = \lambda_t \left(1 - \frac{\partial p_t}{\partial P_{j,t}} \right) + \lambda_j \frac{\partial I_{j,t}}{\partial P_{j,t}}$$

Из уравнения:

$$-\lambda_1 = \frac{\lambda_6 i_{6,1}}{1 - \sigma_{6,1}} = \frac{\lambda_B i_{B,1}}{1 - \sigma_{B,1}} = \dots = \frac{\lambda_r i_{r,1}}{1 - \sigma_{r,1}};$$

$$-\lambda_2 = \frac{\lambda_6 i_{6,2}}{1 - \sigma_{6,2}} = \frac{\lambda_B i_{B,2}}{1 - \sigma_{B,2}} = \dots = \frac{\lambda_r i_{r,2}}{1 - \sigma_{r,2}};$$

.....
(4)

Из уравнений (7) и (9) получаем условия оптимизации:

$$-\lambda_1 = \frac{b_1}{1 - \sigma_{ТЭС1}} = \frac{\lambda_B i_{B,1}}{1 - \sigma_{B,1}} = \frac{\lambda_r i_{r,1}}{1 - \sigma_{r,1}} = \dots;$$

$$-\lambda_2 = \frac{b_2}{1 - \sigma_{ТЭС2}} = \frac{\lambda_B i_{B,2}}{1 - \sigma_{B,2}} = \frac{\lambda_r i_{r,2}}{1 - \sigma_{r,2}} = \dots;$$

.....

Все величины входящие в (10), за исключением множителей Лагранжа, определяются энергетическими характеристиками оборудования (относительными приростами ТЭС- b и СЭС- i) и параметрами электрической сети (относительными приростами потерь мощности σ), поэтому и получим окончательном виде уравнение оптимизации:

$$\frac{b}{1 - \sigma_{ТЭС}} = \lambda_6 \frac{i_6}{1 - \sigma_6} = \lambda_B \frac{i_B}{1 - \sigma_B} = \dots = \lambda_r \frac{i_r}{1 - \sigma_r}$$

Условие (11) имеет следующий смысл: для наивыгоднейшего распределения нагрузки необходимо для всего периода оптимизации соблюдать постоянное соотношение λ между ТЭС и СЭС b нагрузка должна распределяться по соотношению.

$$\lambda_6 = \frac{b}{1 - \sigma} \frac{i_6}{1 - \sigma_6} \tag{12}$$

Между ТЭС и СЭС B по соотношению.

$$\lambda_B = \frac{b}{1 - \sigma} \frac{i_B}{1 - \sigma_B} \tag{13}$$

и так далее.

Разномерность и физический смысл множителей Лагранжа.

Рассмотрим простейшую систему, состоящую из одной ТЭС и одной СЭС. Условие наивыгоднейшего распределения нагрузки имеет вид:

$$b = \lambda i$$

$$b = \frac{\Delta B_{ТЭС}}{\Delta P_{ТЭС}}, \quad i = \frac{\Delta I_j}{\Delta P_i} \text{ тогда}$$

$$\lambda = \frac{\frac{\Delta B_{ТЭС}}{\Delta P_{ТЭС}}}{\frac{\Delta I_j}{\Delta P_i}} \tag{14}$$

Рассмотрим случай, когда мощности, вырабатываемые на станциях, равны $\Delta P_{ТЭС} = \Delta P_{СЭС}$. Тогда уравнение примет вид

$$\lambda = \Delta B_{ТЭС} / \Delta I$$

Следовательно, λ — мера эффективности использования солнечной энергии в системе. Этот коэффициент показывает какое количество топлива будет сэкономлено при использовании солнечных ресурсов на СЭС.

Отсюда видна эффективность использования СЭС в системе одновременной работы с тепловой электростанцией. Если СЭС работает в минимальном режиме, то в системе возрастает нагрузка на ТЭЦ и она потребляет большее количество топлива.

Каждый введенный кВт мощности СЭС будет давать значительную экономию топлива за счет разгрузки неэкономичного оборудования ТЭС

В качестве источника электрической энергии для СЭС использованы солнечные батареи (СБ), преобразующие солнечную энергию в электрическую энергию постоянного тока. Характеристика СБ представлена в таблице 1.

Таблица 1 Характеристика солнечного модуля
Table 1. Description of the sun module

P_{max} , Вт	230
U_{max} , В	28,22
I_{max} , А	8,15
A , м	1,65
B , м	0,99
$S_{сб}$, м ²	1,6335
a , м	0,156
b , м	0,156
s , м ²	0,024336
n , шт	60
$S_{абсорб}$, м ²	1,46016
η , %	15,7517
$K_{запол}$, %	89,38843

где P_{max} — максимальная выходная мощность СБ;
 U_{max} — максимальное напряжение холостого хода;
 I_{max} — максимальный ток короткого замыкания;
 A, B — длина и ширина СБ;

$S_{сб}$ — площадь солнечной батареи;

a, b — длина и ширина модуля СБ;

s — площадь одного модуля;

n — количество модулей в СБ;

$S_{абсорб} = n \cdot s$ — площадь абсорбера;

η — коэффициент полезного действия СБ;

$K_{запол}$ — коэффициент заполнения модулями

СБ;

Солнечная электростанция состоит из $N=347827$ модулей, которые установлены под углом $\alpha = 44^{\circ}56'$ к горизонту. Рабочая площадь станции $S_{раб}=507883 \text{ м}^2$

Тепловая электростанция на выработку 1 кВт·ч электроэнергии расходует $b=340$ грамм условного топлива (г.у.т.)

С целью оптимизации совместной работы СЭС и ТЭС и уменьшения выбросов CO_2 на ТЭС в результате сгорания топлива произведены расчеты, значения которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 Расчетные значения параметров совместной работы СЭС и ТЭС мощностью по 80МВт
Table 2 Calculation values of parameters of joint work by a sun and thermal ES by power for 80 MWt

№	Величина	Ед. изм.	Месяц											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Выработка энергии на ТЭС без ввода СЭС														
1	$W_{ТЭС}$	МВт·ч	59520	53760	59520	57600	59520	57600	59520	59520	57600	59520	57600	59520
2	$B_{ТЭС}$	т.у.т.	20237	18278	20237	19584	20237	19584	20237	20237	19584	20237	19584	20237
Выработка энергии на СЭС														
3	$I_{ясн}$	Вт/м ²	107848	125584	176012	195249	213881	209416	211557	207104	187242	159486	126324	93316
4	$I_{ср. обл.}$	Вт/м ²	33275	45516	77708	106544	137744	147329	156550	143012	122177	89771	46565	28173
5	$W_{ясн 1}$	МВт·ч	8628	10047	14081	15620	17111	16753	16925	16568	14979	12759	10106	7465
6	$W_{ср. обл 1}$	МВт·ч	2662	3641	6217	8524	11020	11786	12524	11441	9774	7182	3725	2254
Процент замещения ТЭС														
7	$\mu_{ясн}$	%	14,50	16,88	23,66	26,24	28,75	28,15	28,44	27,84	25,17	21,44	16,98	12,54
8	$\mu_{ср. обл}$	%	4,47	6,12	10,44	14,32	18,51	19,80	21,04	19,22	16,42	12,07	6,26	3,79
Выработка энергии на ТЭС при работе СЭС														
9	$W_{ясн 2}$	МВт·ч	50892	43713	45439	41980	42410	40847	42595	42952	42621	46761	47494	52055
10	$W_{ср. обл 2}$	МВт·ч	56858	50119	53303	49076	48500	45814	46996	48079	47826	52338	53875	57266
11	$B_{ясн 2}$	т.у.т.	17303	14862	15449	14273	14419	13888	14482	14604	14491	15899	16148	17699
12	$B_{ср. обл 2}$	т.у.т.	19332	17041	18123	16686	16490	15577	15978	16347	16261	17795	18317	19471
Количество сэкономленного топлива за счет ввода СЭС														
13	$B_{ясн 1}$	т.у.т.	2933	3416	4788	5311	5818	5696	5754	5633	5093	4338	3436	2538
14	$B_{ср. обл 1}$	т.у.т.	905	1238	2113	2898	3747	4007	4258	3890	3323	2442	1267	766
15	$M_{ясн 1}$	т.	4804	5594	7841	8697	9528	9329	9424	9226	8341	7104	5627	4157
16	$M_{ср. обл 1}$	т.	1482	2028	3462	4746	6136	6563	6974	6371	5442	4000	2074	1255

где $W_{ТЭС} = P_{ТЭС} \cdot k \cdot 24$ — энергия вырабатываемая на ТЭС без ввода СЭС

k — количество дней в месяце;

$B_{ТЭС} = W_{ТЭС} \cdot b \cdot 10^3$ — количество топлива сжигаемое ТЭС без ввода

СЭС;

$I_{ясн}$ — солнечная активность на СБ при ясном небосводе;

$I_{ср. обл.}$ — солнечная активность на СБ при средней облачности;

$W_{ясн 1} = I_{ясн} \cdot S_{абсорб} \cdot N \cdot z \cdot 10^{-9}$ — энергия выработанная на СЭС при ясном небосводе;

$W_{ср. обл 1} = I_{ср. обл.} \cdot S_{абсорб} \cdot N \cdot z \cdot 10^{-9}$ — энергия выработанная на СЭС при средней облачности;

$\mu_{ясн} = W_{ясн 1} \cdot 100 / W_{ТЭС}$, $\mu_{ср. обл.} = W_{ср. обл 1} \cdot 100 / W_{ТЭС}$ — процент замещения ТЭС

При вводе СЭС при ясном небосводе и при средней облачности;

$$W_{ясн 2} = W_{ТЭС} - W_{ясн 1}, W_{ср. обл 2} = W_{ТЭС} - W_{ср. обл 1}$$

энергия, вырабатываемая на

ТЭС при работе СЭС при ясном небосводе и при средней облачности;

$$B_{ясн 2} = W_{ясн 2} \cdot b \cdot 10^3, B_{ср. обл 2} = W_{ср. обл 2} \cdot b \cdot 10^3$$

количество топлива

сжигаемо на ТЭС при работе СЭС при ясном небосводе и при средней

облачности;

$$M_{ясн 1} = W_{ясн 1} \cdot b \cdot j \cdot 10^3, M_{ср. обл 1} = W_{ср. обл 1} \cdot b \cdot j \cdot 10^3$$

количество

экономленного топлива за счет ввода СЭС при ясном небосводе и при

средней облачности;

$M_{ясн 1} = W_{ясн 1} \cdot b \cdot j \cdot 10^3, M_{ср. обл 1} = W_{ср. обл 1} \cdot b \cdot j \cdot 10^3$ — масса CO₂

$j=0,018977$ т – количество CO₂ при сжигании 1 т.у.т..

По полученным данным построены графики зависимости генерируемой электрической энергии

СЭС и ТЭС в ясный день (рис. 1) и при средней облачности (рис. 2).

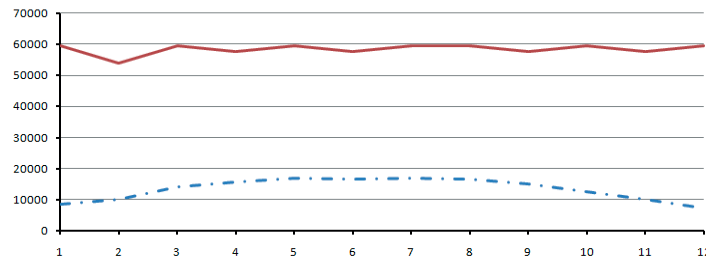


Рис. 1. Генерирование СЭС и ТЭС в ясный день.
Fig. 1. Generating by a sun and thermal ES in a clear day.

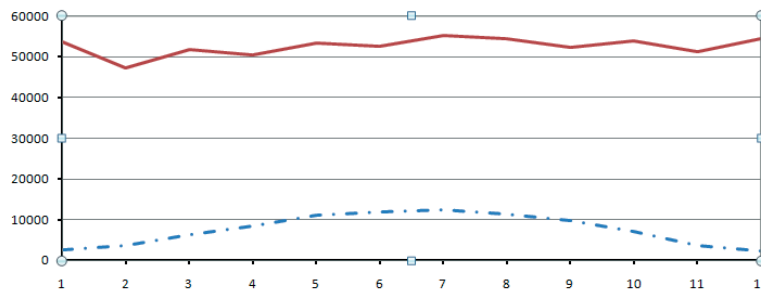


Рис. 2. Генерирование СЭС и ТЭС при средней облачности.
Fig. 2. Generating by a sun and thermal ES at a middle cloudiness.

ВЫВОДЫ

Анализ совместной работы СЭС и ТЭС одинаковой мощности, показывает, что использование СЭС дает возможность экономии 54754,26 т.у.т. при ясном небосводе и 30854,78 т.у.т. при средней облачности в год, при этом на 89672 т. при ясном небосводе и 50531 т. при средней облачности в год уменьшается количество выбросов CO_2 в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов Н., Веников В., Ежков В., 1974.: Расчеты и анализ режимов работы сетей. - М.: Энергия. – 336.
2. Веников В., Зуев Э., Литкенс И., 1981.: Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики. - М.: Высшая школа. – 288.
3. Веников В. и др., 1981.: Оптимизация режимов электростанции и энергосистем. -М., Энергоиздат. – 464.
4. Веников В., Горушкин В., Маркович И. и др., 1973.: Электрические системы. Электрические расчеты программирования и оптимизации режимов. -М.: Высшая школа. – 320.
5. ДСТУ-НБВ.11-27.2011 «Строительная климатология». – 86.
6. Даффин Дж., Бекман У., 1977.: Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. -М.: Мир. – 420.

7. Мельничук М., Дубровін В., Красовські Є, Поліщук В., 2011.: Аналіз сучасного стану і перспектив розвитку світової та української сонячної енергетики// MOTROL. - №13D, 5 – 11.

OPTIMIZATION OF MODES OF PARTITION OF LOAD IN THE COMBINED SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Summary. Possibility of optimization of the modes of operations of sun power-station and thermal power-station is in-process examined. Calculations are produced and an analysis is conducted when in the system of power supply there is a generation of electric energy from sun power-station and the economy of traditional resources of renewable energy sources is expected.

Key words: optimization, electric stations, expense of fuel, power, renewable energy, sun power-station.