

DOI: <https://doi.org/10.36719/2789-6919/57/180-185>

**Fərqañ Əsədov**

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti  
fizika üzrə fəlsəfə doktoru  
<https://orcid.org/0009-0005-0258-485X>  
farqanasadov@mail.ru

**Eldar Mustafayev**

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti  
magistrant  
<https://orcid.org/0009-0003-3764-6665>  
eldarmv077@gmail.com

## **Yüksək güclü Günəş Elektrik Stansiyalarında (GES) istismar rejimlərinin enerji səmərəliliyinə təsiri**

### **Xülasə**

Müasir enerji sistemlərində yüksək güclü Günəş Elektrik Stansiyaları (GES) bərpa olunan enerji mənbələri arasında mühüm yer tutur. Günəş enerjisi ekoloji cəhətdən təmiz və tükənməyən enerji mənbəyi olmaqla yanaşı, enerji təhlükəsizliyinin təmin olunmasına və karbon emissiyalarının azaldılmasına da mühüm töhfə verir. Son illərdə texnologiyanın inkişafı və günəş panellərinin səmərəliliyinin artması nəticəsində iri güclü Günəş Elektrik Stansiyalarının tikintisi və istismarı geniş yayılmışdır.

GES-lərin istehsal etdiyi elektrik enerjisinin həcmi yalnız quraşdırılmış gücdən asılı deyil. Enerji istehsalına istismar rejimləri, idarəetmə strategiyaları, meteoroloji şərait, günəş radiasiyasının intensivliyi və avadanlıqların texniki vəziyyəti də ciddi təsir göstərir. Xüsusilə böyük gücə malik stansiyalarda optimal iş rejiminin seçilməsi enerji istehsalının artırılmasına və sistemin ümumi səmərəliliyinin yüksəldilməsinə imkan verir.

Günəş Elektrik Stansiyalarında müxtəlif istismar rejimləri tətbiq olunur. Bunlara maksimal güc nöqtəsinin izlənməsi (MPPT) rejimi, sabit güc rejimi və enerji saxlama sistemləri ilə inteqrasiya olunmuş hibrid rejimlər daxildir. Bu rejimlərin düzgün tətbiqi günəş panellərindən maksimum enerji əldə etməyə və enerji itkilərini minimuma endirməyə imkan verir.

Bu məqalədə yüksək güclü GES-lərdə müxtəlif istismar rejimlərinin enerji səmərəliliyinə təsiri təhlil edilir, onların üstünlükləri müqayisə olunur və daha optimal istismar yanaşmaları müəyyənləşdirilir.

***Açar sözlər:** günəş elektrik stansiyası, enerji səmərəliliyi, istismar rejimi, inverter, MPPT, itkilər*

**Fərqañ Asadov**

Azerbaijan State Oil and Industry University  
PhD in Physics  
<https://orcid.org/0009-0005-0258-485X>  
farqanasadov@mail.ru

**Eldar Mustafayev**

Azerbaijan State Oil and Industry University  
Master's student  
<https://orcid.org/0009-0003-3764-6665>  
eldarmv077@gmail.com

## Impact of Operating Modes on Energy Efficiency in High-Power Solar Power Plants

### Abstract

In modern energy systems, high-power Solar Power Plants (SPPs) occupy an important place among renewable energy sources. Solar energy is an environmentally friendly and inexhaustible energy source that significantly contributes to ensuring energy security and reducing carbon emissions. In recent years, due to technological advancements and the increasing efficiency of photovoltaic panels, the construction and operation of large-scale Solar Power Plants have become widespread.

The amount of electrical energy generated by SPPs does not depend solely on the installed capacity. Energy production is also strongly influenced by operating modes, control strategies, meteorological conditions, solar radiation intensity, and the technical condition of equipment. Especially in large-capacity power plants, selecting an optimal operating mode makes it possible to increase energy generation and improve the overall efficiency of the system.

Various operating modes are applied in Solar Power Plants. These include Maximum Power Point Tracking (MPPT) mode, constant power mode, and hybrid modes integrated with energy storage systems. Proper implementation of these modes allows the system to obtain maximum energy from solar panels while minimizing energy losses.

This article analyzes the impact of different operating modes on the energy efficiency of high-power Solar Power Plants, compares their advantages, and identifies the most optimal operational approaches.

**Keywords:** *Solar power plant, energy efficiency, operating mode, inverter, MPPT, losses*

### Giriş

Son illərdə qlobal enerji siyasətində karbon emissiyalarının azaldılması və enerji təhlükəsizliyinin artırılması məqsədilə iri güclü GES-lərin qurulması geniş vüsət almışdır. Lakin istismar təcrübəsi göstərir ki, yüksək güclü GES-lərdə real enerji istehsalı nəzəri hesablamalardan əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənə bilər. Bu fərqi əsas səbəblərindən biri istismar rejimlərinin düzgün seçilməməsi və idarə olunmamasıdır. Buna görə də istismar rejimlərinin enerji səmərəliliyinə təsirinin öyrənilməsi aktual elmi-praktik məsələdir (Atesin, 2019).

Müasir dövrdə enerji tələbatının sürətlə artması və ənənəvi enerji mənbələrinin məhdudluğu bərpa olunan enerji mənbələrinin inkişafını zəruri etmişdir. Bu mənbələr arasında günəş enerjisi xüsusilə böyük potensiala malik olmaqla enerji sistemlərinin dayanıqlı inkişafında mühüm rol oynayır. Günəş Elektrik Stansiyaları (GES) ekoloji cəhətdən təmiz enerji istehsal etməklə yanaşı, atmosferə zərərli qaz emissiyalarını azaltmağa və enerji təhlükəsizliyinin təmin olunmasına mühüm töhfə verir. Son illərdə fotovoltaiq texnologiyaların inkişafı, günəş panellərinin səmərəliliyinin artması və istehsal xərclərinin azalması nəticəsində yüksək güclü Günəş Elektrik Stansiyalarının qurulması və istismarı geniş yayılmışdır (Bagher, 2015).

Yüksək güclü GES-lərin effektiv fəaliyyəti yalnız quraşdırılmış gücdən və istifadə olunan avadanlıqların texniki göstəricilərindən asılı deyil. Elektrik enerjisinin istehsal həcmi və sistemin ümumi səmərəliliyi bir çox amillərin, o cümlədən istismar rejimlərinin, idarəetmə strategiyalarının, günəş radiasiyasının intensivliyinin, temperatur şəraitinin və digər meteoroloji faktorların təsiri altında formalaşır. Xüsusilə iri gücə malik günəş elektrik stansiyalarında düzgün seçilmiş istismar rejimi enerji istehsalının optimallaşdırılmasına, enerji itkilərinin azaldılmasına və avadanlıqların daha etibarlı işləməsinə şərait yaradır (Bajenescu, 2015).

Günəş Elektrik Stansiyalarında tətbiq olunan müxtəlif istismar rejimləri enerji istehsalının maksimum səviyyədə təmin olunmasına yönəlmişdir. Bu rejimlər arasında maksimal güc nöqtəsinin izlənməsi (MPPT) rejimi, sabit güc rejimi və enerji saxlama sistemləri ilə inteqrasiya olunmuş hibrid

rejimlər xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Hər bir rejim enerji sisteminin xüsusiyyətlərinə və mövcud istismar şəraitinə uyğun olaraq seçilir və tətbiq olunur (Compaan, 2001).

Bu baxımdan, yüksək güclü Günəş Elektrik Stansiyalarında istismar rejimlərinin enerji səmərəliliyinə təsirinin öyrənilməsi mühüm elmi və praktiki əhəmiyyət kəsb edir. Məqalədə müxtəlif istismar rejimləri təhlil olunur, onların enerji istehsalına təsiri müqayisə edilir və Günəş Elektrik Stansiyalarının daha səmərəli istismarını təmin edən optimal yanaşmalar müəyyənləşdirilir.

### Tədqiqat

Yüksək güclü GES-lərdə istismar rejimləri aşağıdakı əsas qruplara bölünür (Di Vece, 2019):

1. Nominal güc rejimi. Bu rejimdə GES maksimal günəş radiasiyası şəraitində, layihə parametrlərinə uyğun olaraq işləyir. Bu zaman panellər, invertorlar və transformatorlar optimal yüklənmə vəziyyətində olur və enerji çevrilmə səmərəliliyi maksimum səviyyəyə yaxınlaşır.

2. Qismən yüklənmə rejimi. Buludluluq, səhər və axşam saatları, mövsümi dəyişikliklər zamanı GES qismən yüklənmə rejimində işləyir. Bu rejimdə invertorların faydalı iş əmsalı azalır, daxili elektrik itkiləri isə nisbətən artır.

3. Pik yüklənmə və məhdudlaşdırma (curtailment) rejimi. Elektrik şəbəkəsinin ötürmə qabiliyyəti məhdud olduqda və ya sistem balansını pozulduqda GES-lərin gücü süni şəkildə məhdudlaşdırılır. Bu rejim enerji itkisinə və iqtisadi səmərəliliyin azalmasına səbəb olur.

4. Texniki xidmət və ehtiyat rejimi. Planlı texniki xidmət və ya qəza hallarının qarşısının alınması məqsədilə GES-in müəyyən hissələri istismardan çıxarılır. Bu isə ümumi enerji istehsalının azalması ilə nəticələnir. İstismar rejimlərinin enerji səmərəliliyinə təsiri bir neçə əsas mexanizm vasitəsilə formalaşır (Gay, 2018; Owano, 2015):

Elektrik itkiləri - qismən yüklənmə zamanı invertor və kabellərdə nisbi itkilər artır.

Temperatur təsiri - yüksək temperaturda panellərin çıxış gərginliyi azalır, bu isə ümumi faydalı gücü aşağı salır.

MPPT idarəetməsinin effektivliyi - maksimum güc nöqtəsinin izlənməsi alqoritmlərinin keyfiyyəti dəyişkən iş rejimlərində xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Şəbəkə ilə uyğunlaşma - reaktiv gücün idarə olunması və gərginlik stabilliyi düzgün təmin edilmədikdə enerji itkisi yaranır.

Yüksək güclü GES-lərdə enerji səmərəliliyinin artırılması üçün aşağıdakı tədbirlər məqsəduyğundur (Omer, 2009; Green, 2014; Nshimiyimana, 2018; Płaczek-Popko, 2017):

- yüksək səmərəli invertorların və transformatorların tətbiqi;
- iki oxlu və ya bir oxlu izləmə sistemlərinin istifadəsi;
- real vaxt rejimində monitoring və SCADA sistemlərinin tətbiqi;
- optimallaşdırılmış texniki xidmət qrafiklərinin hazırlanması;
- enerji yığıma sistemləri vasitəsilə pik yüklənmə məhdudiyyətlərinin azaldılması.

Gündəlik enerji istehsalı və itkilər balansını (100 MWp GES) üçün verilənlər (Gu, 2012):

Quraşdırılmış DC güc:  $P_{DC} = 100 \text{ MWp}$

Günəş resursu (POA üzrə "peak sun hours"):  $PSH = 5.2 \text{ saat/gün}$

İdeal (itkisiz) DC enerji:

$$E_{DC,ideal} = P_{DC} \times PSH = 100 \times 5.2 = 520 \text{ MWh/gün}$$

İtki payları (nümunəvi): tozlanma, uyğunsuzluq, kabellər, temperatur, əlçatanlıq, invertor, AC+transformator, şəbəkə məhdudiyyəti (curtailment).

### Cədvəl 1.

İtki strukturu və qalıq əmsal

İtki mənbəyi	Pay, %	Qalıq əmsal (1–itki)
Tozlanma (soiling)	2.0	0.980
String mismatch	1.5	0.985
DC kabel itkiləri	1.5	0.985
Temperatur itkisi	7.0	0.930
Əlçatanlıq (availability)	1.0	0.990
İnvertor çevrilmə itkisi	2.5	0.975
AC kabel + transformator	1.5	0.985
Curtailement (şəbəkə məhdud.)	3.0	0.970

Ümumi qalıq əmsal:

$$K = \prod(1 - \text{itki}) \approx 0.8155$$

Deməli, real AC enerjisi:

$$E_{AC} = E_{DC, \text{ideal}} \times K = 520 \times 0.8155 \approx 424.1 \text{ MWh/gün}$$

### Cədvəl 2.

Enerji balansı (gündəlik)

Göstərici	Dəyər
İdeal enerji (itkisiz)	520.0 MWh/gün
Ümumi itkilərdən sonra real enerji	424.1 MWh/gün
Ümumi nisbi itki	18.45%
Performans nisbəti ( $PR \approx E_{AC} / E_{\text{ideal}}$ )	0.8155

İstismar rejimi “curtailement”in enerji səmərəliliyinə təsiri üçün verilənlər (Julajaturasirath, 2012):

GES potensial olaraq gündəlik saatlarında 95 MW orta güc verə bilər.

Şəbəkə limitinə görə çıxış 80 MW ilə məhdudlaşdırılır.

Məhdudiyət müddəti: 2 saat/gün

Curtailement enerji itkisi:

$$E_{\text{curt}} = (95 - 80) \times 2 = 30 \text{ MWh/gün}$$

Əgər həmin gün real istehsal (curtailement daxil) məsələn 424 MWh/gün idisə, curtailement olmasaydı (Kim, 2003; Rizwan et al., 2021; Rodriguez et al., 2021):

$$E_{\text{no curt}} = 424 + 30 = 454 \text{ MWh/gün}$$

### Cədvəl 3.

Curtailement təsiri

Göstərici	Dəyər
Şəbəkə limiti	80 MW
Potensial orta güc	95 MW
Məhdudiyət müddəti	2 saat/gün
Curtailement itkisi	30 MWh/gün
İstehsal (curtailement ilə)	424 MWh/gün
İstehsal (curtailementsiz)	454 MWh/gün
Curtailementin istehsala təsiri	$30/454 = 6.61\%$

Yüksək güclü GES-lərdə istismar rejimi kimi “curtailment” bəzən bütün texniki itkilər qədər kritik ola bilər.

İnvertorun qismən yüklənmə rejimi (part-load) — illik enerji təsirinin nəticəsi aşağıdakı kimidir. Yüksək güclü GES-lərdə invertorlar günün böyük hissəsində nominaldan aşağı yüklənmə ilə işləyir. İnvertor səmərəliliyi ( $\eta$ ) yüklənmədən asılıdır (Li, 2019).

Enerji paylanması:

10% enerji — 10% yükdə

20% enerji — 20% yükdə

40% enerji — 50% yükdə

30% enerji — 100% yükdə

Səmərəliliklər:

$\eta(10\%)=96.0\%$

$\eta(20\%)=97.5\%$

$\eta(50\%)=98.5\%$

$\eta(100\%)=98.0\%$

Çəkili orta səmərəlilik:

$$\eta_{avg}=0.10 \cdot 0.96 + 0.20 \cdot 0.975 + 0.40 \cdot 0.985 + 0.30 \cdot 0.98 = 0.979$$
$$\eta_{avg}=97.9\%$$

Əgər invertora daxil olan illik DC enerji  $E_{DC,in} = 180$  GWh/il olsa:

$$EAC = EDC,in \times \eta_{avg} = 180 \times 0.979 = 176.22 \text{ GWh/il}$$

#### Cədvəl 4.

Part-load səmərəliliyi (çəkili)

Yük səviyyəsi	Enerji payı	$\eta$	Pay $\times\eta$
10%	0.10	0.960	0.0960
20%	0.20	0.975	0.1950
50%	0.40	0.985	0.3940
100%	0.30	0.980	0.2940
Cəm	1.00		0.9790

İnvertor seçimi və istismar strategiyası (məs. MPPT kanallarının bölgüsü, string dizaynı) qismən yüklənmədə illik GWh səviyyəsində fərq yarada bilər.

Aparılan təhlil göstərir ki, istismar rejimləri yüksək güclü GES-lərin enerji səmərəliliyinə birbaşa və dolaylı təsir göstərir. Xüsusilə qismən yüklənmə və məhdudlaşdırma rejimləri ümumi faydalı enerji istehsalının azalmasına səbəb olur. Buna baxmayaraq, düzgün idarəetmə strategiyaları və müasir texnologiyaların tətbiqi ilə bu təsirlərin minimuma endirilməsi mümkündür (Lin, 2012).

#### Nəticə

Nəticə olaraq qeyd etmək olar ki, yüksək güclü GES-lərdə enerji səmərəliliyinin təmin edilməsi yalnız avadanlıqların texniki göstəricilərindən deyil, həm də istismar rejimlərinin düzgün seçilməsindən və idarə olunmasından asılıdır. Optimal istismar rejimlərinin tətbiqi GES-lərin həm enerji, həm də iqtisadi effektivliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır və bərpa olunan enerji sistemlərinin dayanıqlı inkişafına töhfə verir.

#### Ədəbiyyat

1. Atesin, T. A., Bashir, S., & Liu, J. L. (2019). *Nanostructured Materials for Next-generation Energy Storage and Conversion: Photovoltaic and Solar Energy*. Springer Nature.

2. Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., & Mohsen, M. (2015). Types of solar cells and application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 94–113.
3. Bajenescu, T. M. I. (2015). Present and future of photovoltaics. *Electroteh. Electron. Autom.*, 63(1), 31.
4. Compaan, A., Deng, X., & Bohn, R. (2001). *High efficiency thin film CdTe and a-Si based solar cells: Annual Technical Report (4 March 1999 – 3 March 2000)*.
5. Di Vece, M. (2019). Using Nanoparticles as a Bottom-up Approach to Increase Solar Cell Efficiency. *KONA Powder Part. J.*, 2019005.
6. Gay, D., Rogers, T., & Shirley, R. (2018). Small island developing states and their suitability for electric vehicles and vehicle-to-grid services. *Utility Policy*, 55, 69–78.
7. Green, M. A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*, 8(7), 506–514.
8. Gu, X., Yu, X., Guo, K., Chen, L., Wang, D., & Yang, D. (2012). Seed-Assisted Cast Quasi-Single Crystalline Silicon for Photovoltaic Application: Towards High Efficiency and Low-Cost Silicon Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 101, 95–101.
9. Julajaturasirarath, S., Jonburom, W., & Pornsuwancharoen, N. (2012). The experiment of double solar energy by reflection light method. *Procedia Engineering*, 32, 522–530.
10. Kim, D. S., Gabor, A., Yelunder, V., Upadhyaya, A., Meemongkolkiat, V., & Rohatgi, A. (2003). String ribbon silicon solar cells with 17.8% efficiency. Paper presented at the *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*.
11. Li, D. B., Song, Z., Awani, R. A., Bista, S. S., Shrestha, N., Grice, C. R., & Phillips, A. B. (2019). Eliminating s-kink to maximize the performance of MgZnO/CdTe solar cells. *ACS Applied Energy Materials*, 2(4), 2896–2903.
12. Lin, W. M., Chang, K. C., Liu, Y. M., & Chung, K. M. (2012). Field surveys of non-residential solar water heating systems in Taiwan. *Energies*, 5(2), 258–269.
13. Nshimiyimana, E. (2018). *Design of home electricity supply system using solar PV and its integration to the national grid: A case study of Masaka Village*. PAUWES.
14. Omer, A. M. (2009). Sustainable energy: Challenges of implementing renewable technologies. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, 1(1), 1–23.
15. Owano, N. (2015). *Japan has floating solar power plants in Hyogo Prefecture*. April 24.
16. Płaczek-Popko, E. (2017). Top PV market solar cells 2016. *Opto-Electronics Review*, 25(2), 55–64.
17. Rizwan, M., Khan, W. S., & Zaman, K. (2021). *Polycrystalline silicon solar cells*. In *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*. Elsevier.
18. Rodriguez, A., Gonzalez, C., Fernandez, A., Rodriguez, F., Delgado, T., & Bellman, M. (2021). Automatic solar cell diagnosis and treatment. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(4), 1163–1172.

Daxil oldu: 05.01.2026

Qəbul edildi: 14.04.2026