

# The Optimal Choice of Electrochemical Energy Storage Parameters

## Author

Jarosław Korpikiewicz

## Keywords

energy storage, optimization, Smart Grid

## Abstract

The possibility of using energy storage in a power system is being highlighted increasingly often. Its operating mode or manner of use is called the “storage usage strategy”. One of them, program operation, was selected for this study. An algorithm of the supervisory control of storage for a chosen strategy is described. Simulation results are presented. The investor may face a dilemma of how to select parameters for the storage operated in a strategy. Based on the simulation results, technical and economic optimisation indicators were determined. A pattern of the selection of total storage capacity for the chosen strategy was developed, taking into account various types of electrochemical storage, with a fixed usable capacity. The considered optimisation problem is to establish a compromise between storage life and its effective use.

**DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2016105**

## 1. Introduction

The issue of choosing parameters of a storage system connected to a power system is a complex one. In order to solve it, it is necessary to determine the technical and operational parameters of the storage facility and choose its utilisation strategy. For the chosen strategy it is then required to develop an optimisation algorithm which will define storage operating hours, determined by charging and discharging power at individual hours.

This enables simulating storage system operation. A set of input data – electricity prices for a selected period from the Polish Power Exchange – was defined to carry out the simulation.

Tab. 1 above presents a definition of parameters of energy storage systems used in a power system. Tab. 2 presents values of those parameters for different technologies. There are many variants of cell designs and materials within each technology. For this reason, some parameters are given as value ranges.

| No. | Parameter                                                                   | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Total (nominal) capacity of the storage system $Q_n$                        | Amount of energy which can be accumulated in the storage, expressed in MWh                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2   | Operational capacity of the storage system $Q_u$                            | Usable part of the total capacity of the storage system available for executing chosen strategy, MWh Sometimes it is more convenient to use the $Q_u/Q_n$ ratio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3   | Depth of discharge of the storage system <b>DOD</b><br>(Depth of discharge) | Depth of discharge expressed in % of the nominal (total) capacity. State of charge is a complementary parameter, i.e. SOC = 100% - DOD, expressed in %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4   | Turnaround energy storage efficiency<br>$\eta_{\text{cycle}}$               | Efficiency of a full cycle of storage system charging and discharging has been defined as follows (power control with hourly resolution had been assumed):<br>$\eta_{\text{cycle}} = \frac{\text{energy fed to the grid}}{\text{energy consumed from the grid}} = \frac{\sum_{i=1}^d P_{\text{disch},i} \cdot t_i}{\sum_{j=1}^c P_{\text{ch},j} \cdot t_j} \quad (1)$<br>where:<br>$P_{\text{disch},i}$ – power fed into grid [MW] during the time of $t_i$ [h]<br>$d$ – number of discharge hours, $c$ - number of charge hours<br>$P_{\text{ch},j}$ – power consumed from the grid [MW] during the time of $t_j$ [h] |
| 5   | Characteristic of the storage system's lifetime                             | Maximum number of charge/discharge cycles for the storage system throughout its lifetime, depending on the depth of discharge (DOD).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 6   | Maximum charging power $P_{\text{ch}}$                                      | Maximum continuous power at which the storage system may be charged. Value measured on the alternating current side, MW.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 7   | Maximum discharging power $P_{\text{disch}}$                                | Maximum continuous power at which the storage system may be discharged. Value measured on the alternating current side, MW.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

Tab. 1. Definition of principal technical and operational parameters of energy storage systems

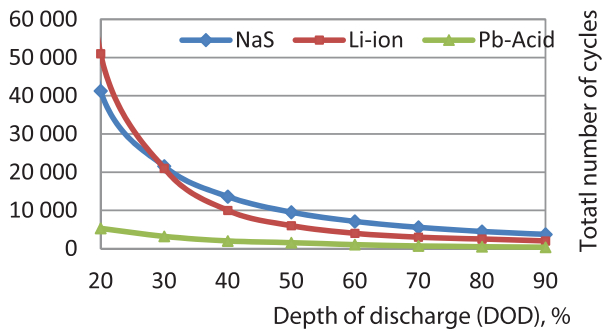


Fig. 1. Characteristic of storage system's lifetime depending on depth of discharge

| Parameter                                  | NaS            | Li-ion        | PbAcid            |
|--------------------------------------------|----------------|---------------|-------------------|
|                                            | sodium-sulphur | lithium-ion   | lead-acid         |
| Power in/out [MW]                          | 1/1            | 1/3           | 1/2               |
| Storage capacity -to-discharge power ratio | 6–7.2          | <b>0.33–4</b> | 2–3<br><b>2.5</b> |
| Turnaround energy storage efficiency [%]   | <b>85–90</b>   | 90– <b>95</b> | <b>75–85</b>      |
| Lifetime [cycles] at DOD of 80%            | 4500           | 2500–3500     | 1000–2000         |
| Lifetime [cycles] at DOD of 100 %          | 3000           | 1500–2000     | 500–1500          |

Tab. 2. Technical parameters of electrochemical storage

Values printed in bold are the ones used in the simulation. When comparing technical parameters of different technologies, we may conclude that lead-acid cells have the lowest efficiency and shortest lifetime (analysis was based on industrial versions of such cells, as the common models are not suitable for the discussed applications<sup>1</sup>, e.g. armour plate cells). They are attractive in terms of price and therefore are often used in UPS systems (low required number of cycles). Lithium-ion cells<sup>2</sup> are characterised by high charging and discharging power, which may be useful for example for load balancing and arbitration. NaS cells may find use in strategies, where capacity is the key operational parameter. Fig. 1 presents lifetime characteristics (number of cycles) of a storage system depending on its depth of discharge. The number of cycles directly depends on the depth of discharge of the storage technology. A disadvantage of electrochemical energy storage systems is their considerable loss of lifetime in the case of DOD growth. If a storage is operated with lower depths of discharge, only part of the total capacity equal to the depth of discharge is being used for a useful purpose. For example, if we use the maximum depth of discharge of 30%, at which the lifetime of NaS and Li-ion storage systems is around 20,000 cycles, then 70% of the total capacity will not be used in the strategy. Thus the lifetime and ability to use the storage to its full capacity are contradictory.

In order to investigate possibilities of using energy storage systems in a power system, it is necessary to define the operating regime (role) of the storage described as a utilisation strategy, develop an operating (control) algorithm for a storage operating under such a strategy, and run a relevant simulation.

## 2. Strategies for utilisation of energy storage systems in power grids

We define strategy as an operating regime or method of operation of energy storage systems in the power grids. Certain strategies have technical applications, others have market applications. Two popular strategies are presented below:

- **programmed operation** – strategy implemented when the energy prices vary over a day, in order to reduce energy demand during high price periods and increase the demand in lower price periods. Using the storage, it is possible to shift part of the demand in time, thus reducing the cost of electricity
- **daily load curve flattening** – this strategy also involves shifting demand in time, but the main goals are not economic aspects, but technical. Shifting part of the demand from the peak load periods into low load periods reduces the peak capacity demand – it allows reducing utilisation of expensive peaking sources, avoiding additional power unit start and increasing the load of base load plants during low-load periods. A secondary benefit is a slight reduction of losses attributable to a reduction of peak loads. Benefits will be greater in the case of larger daily load variations.

## 3. Control algorithm – programmed operation

In order to implement the programmed operation strategy, also known as the arbitration, an algorithm was developed which takes into account restrictions on capacity, charging power and discharging power, and typical parameter values were adopted for lead-acid, lithium-ion and NaS cells (Tab. 3).

The analyses were performed using actual electricity prices recorded at the Polish Power Exchange (TGE), on the Day-Ahead Market (RDN) in 2009–2013. Sessions of the Day-Ahead Market have an hourly resolution. The algorithm assumed that the price vector for the next day is known – then a schedule is developed, i.e. vector of storage power values for the individual hours of the next day. The following algorithm assumptions from that are:

- primary optimisation period – 24 h, i.e. the energy balance is determined for a single day, i.e. all accumulated energy must be used within the same day. This prevents gradual accumulation of energy over a longer period, e.g. a week
- input data: 24-hour vector of electricity prices, storage system parameters
- schedule of storage system's operation is optimised according to the operating profit<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Common lead-acid batteries have lifetimes of some 3200 cycles at DOD = 30%. Parameters of other cell types were assumed on typical levels, i.e. for the standard designs.

<sup>2</sup> Lithium-ion cells are characterised by very high energy storage density (both in terms of weight and volume). This is why they are popularly used in portable equipment such as laptops.

<sup>3</sup> Operating profit is the difference between the sum of revenues from electricity sales and the amount spent on electricity purchase. It takes into account the turnaround efficiency, i.e. the amount of energy which has to be purchased is  $1/\eta$  times higher than the amount of energy sold.

The algorithm has been created in the Matlab environment. The *Analysis* function reads the price data from an MS Excel file; it includes storage system parameters determined for a certain technology; for each day it activates the *Opt* function and writes the results into another MS Excel file. The *Opt* function is an optimisation function which determines the schedule featuring the highest operating profit; its structure is presented in Fig. 2. The function checks the availability of charging/discharging power and capacity, and if they are available, then it iteratively calls the *FindCycle* function. Verification of power and capacity availability involves their gradual reduction, while the consecutive pairs of hours for accumulator charging-discharging cycles are spent. The initial zero vector of the system's power is updated for a spent pair of hours of a storage system's operation. Similarly, the state of charge of the utility part of the storage system is controlled, and operations which would result in going above 100% or below 0% during or at the end of the day are not permissible. The algorithm of the *FindCycle* function is presented in Fig. 3. Its goal is to find the best individual pair of hours (the one which generates the highest operating profit, relative for all possible combinations of charging and discharging hours) at assumed restrictions, i.e. from all available combinations of pairs of charging and discharging hours within a single day; such a pair is found which:

- does not violate technical restrictions (availability of charging and discharging power at specific hours and not exceeding assumed storage capacity)
- is characterised by the highest operating profit as defined by formula 2
- has a relative operating profit as defined by formula 2 higher than or equal to the threshold value.

The relative profit threshold is given as an input parameter. For each single charging and discharging operation, the relative operating profit is defined as (formula 2):

$$prof_{rel} = \frac{prices\_r(indD) \cdot P_{disch} - prices\_c(indC) \cdot P_{ch}}{P_{disch} \cdot lh}$$

where:

indD – discharging hour index; indC – charging hour index;  $P_{disch}$  – value of discharge power determined by the function *LimitV* MW;  $P_{ch}$  – value of charging power determined by the function *LimitV* MW; prices\_d – daily vector of prices for discharging with values changed to 0 for those hours, for which the limit of discharge capacity has already been exhausted or where for several cycles the algorithm has failed to find profit involving that hour; prices\_c – daily vector of prices for charging, with values changed into very high numbers for hours for which the limit of charging capacity has already been exhausted or where for several cycles the algorithm has failed to find profit involving that hour.

The function is executed iteratively until all pairs of charging and discharging hours which would ensure a relative operating profit

at least equal to the threshold value at an assumed turnaround efficiency are exhausted. Relative operating profit has the task of ensuring minimum required profits from charging-discharging operations to cover CAPEX and OPEX throughout the system's lifetime. Moreover, it eliminates execution of charging-discharging operations with a very low operating profit. In the first simulation, the threshold profit value was assumed at 70 PLN/MWh<sup>4</sup>. When a single charge-discharge pair is being determined, the involved powers must fulfil all the limitations concerning balancing and storage system parameters. This is accomplished using the function *LimitV*, which has an algorithm as shown in Fig. 4. The vector of available charging and discharging power is created within the function *Opt* and is updated after each accepted charging and discharging operation. Vector of available usable capacity is determined in the same manner. The *LimitV* function is called whenever possibility of generating profit exists.

Another simulation involved determining a schedule for different usable capacity-to-nominal capacity  $Q_u/Q_n$  ratios, at  $Q_n = 10$  MWh and different values of relative profit threshold. The results were subsequently used to determine the total operating profit (the difference between the value of sold electricity and amount spent on its purchase)<sup>5</sup>, and relative operating time determined as a ratio of the number of days during which the storage operated to all the simulated days. The latter parameter describes the intensity of storage operation, i.e. during which time it was possible to generate operating profit with it. Additionally, a sum of energy fed into a grid (sold) and maximum usable energy  $E_{max}$  accumulated within the entire simulated time frame were determined. The latter parameter allows evaluating whether or not the entire usable capacity was actually utilised. Another value calculated from the schedule is lifetime.

The value of a lifetime index equal to 1 denotes a factory fresh condition, and the value of 0 is achieved after the lifetime is fully exhausted (i.e. after the predetermined number of cycles at assumed DOD, as per lifetime characteristic). Taking into account the simulated period and magnitude of the lifetime loss<sup>6</sup>, we determine the lifetime (duration). Analysis of obtained simulation results should yield value criteria discussed in section 4.

The object of selection is which part of the total capacity should be defined as usable capacity and what the operating profit threshold value should be. If the usable capacity is equal to the total capacity, we will obtain higher operating profit, but shorter battery lifetime. Otherwise, the lifetime may be long, but the operating profit will be much lower. But shortening the battery lifetime increases the frequency of equipment replacement during the assumed operating period, which increases the CAPEX throughout the operation.

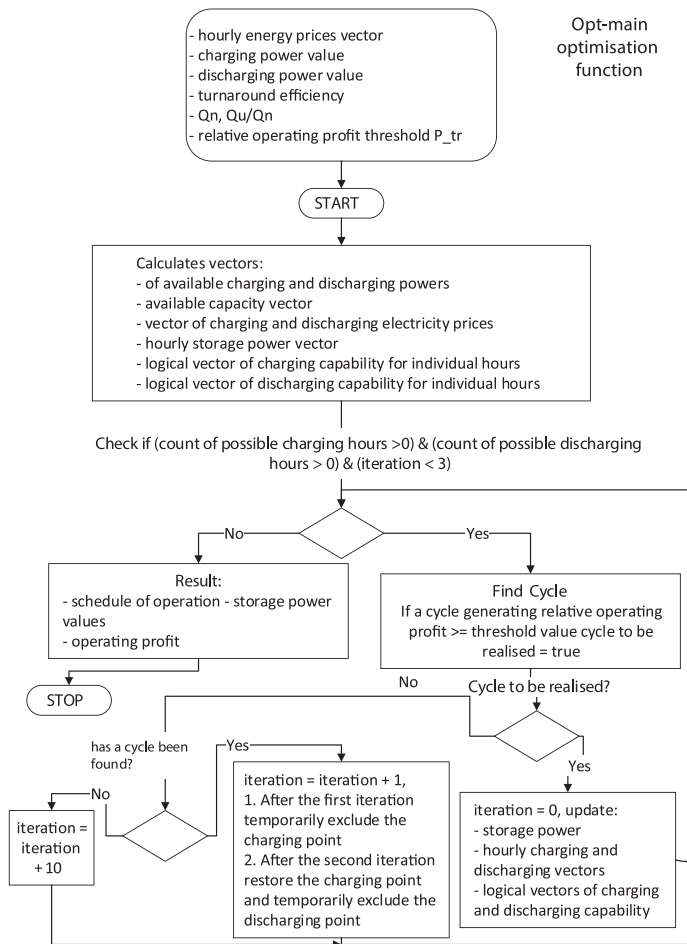
## 4. Simulation results

The first stage of research involved simulation of arbitration operation for different nominal capacities of the storage system,

<sup>4</sup> The value for the first simulation was assumed at an arbitrary level. In the next one it is a parameter. The value of this parameter depends on the distribution of prices within the investigated period.

<sup>5</sup> Operating expenditures were not taken into account in the operating profit.

<sup>6</sup> It is determined upon the storage operations schedule. The DOD of every cycle is determined. By interpolating the lifetime characteristic we may determine the loss of lifetime as a difference of lifetime indexes between and after execution of the analysed schedule.

Fig. 2. Structure of the main optimisation function *Opt*

for price data from 2009–2013. Dependency of operating profit on the nominal capacity value is linear<sup>7</sup>. Therefore, it may not be a basis for optimising storage size. Yet the dependency between the capital expenditures for the storage system and its total capacity is not necessarily linear. This kind of data may be sourced from a potential vendor. Additionally, the cost of connecting the storage system to the grid needs to be taken into account. This will depend on the connection capacity, as well as the condition and availability of grid infrastructure at the selected location. This kind of information may be obtained from the operator of the power system to which the storage is to be connected.

The next stage of the investigation involved simulations with additional parameters: relative profit threshold,  $Q_u/Q_n$  ratio and type of batteries. The results were used to determine several values. Relative operating time was determined as a ratio of the number of days during the storage operates to the total number of days. The average profit PLN/MWh is the ratio between the total operating profit and the sum of energy fed into the grid within a given simulation.

$E_{\max}$  is a maximum value of energy accumulated during the entire simulation, normalized by the usable capacity value. This value shows what share of usable capacity has been used at least once. Maximum accumulated energy was determined for every

<sup>7</sup> When changing nominal capacity, at the same time restrictions for maximum charging and discharging power change in proportion. This led to obtaining mutually proportional operating schedules.

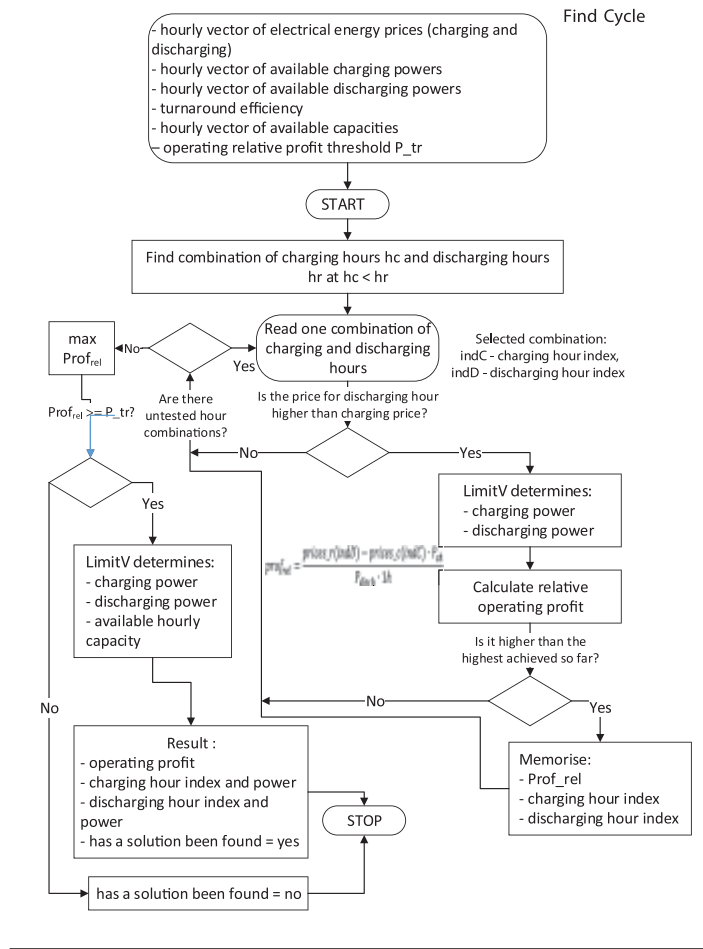


Fig. 3. Algorithm of the function which determines the charging-discharging cycle

| Parameter                      | NaS | Li-ion | PbAcid |
|--------------------------------|-----|--------|--------|
| Capacity MWh                   | 10  |        |        |
| Maximum charging power [MW]    | 1.4 | 10     | 2      |
| Maximum discharging power [MW] | 1.4 | 30     | 4      |
| Turnaround efficiency %        | 85  | 95     | 75     |

Tab. 3. Technical parameters of storage systems used in simulation

day. These were added up and then divided by the product of the number of simulation days and usable capacity.

The operations mentioned above yield the value of usable capacity utilisation coefficient. It determines average relative usable capacity utilised during simulation. Lifetime has been determined upon the number of executed cycles and relevant depth of discharge. During simulation, hourly values of usable energy are determined by the algorithm described in section 2. Total energy is the sum of usable energy and a constant value of  $Q_n - Q_u$ . Using those values of total energy in the storage, the number and depth of discharge of storage were determined. Taking into account characteristics of storage lifetime for a certain

technology, we may find the lifetime loss. Using lifetime loss and simulation duration the lifetime was determined.

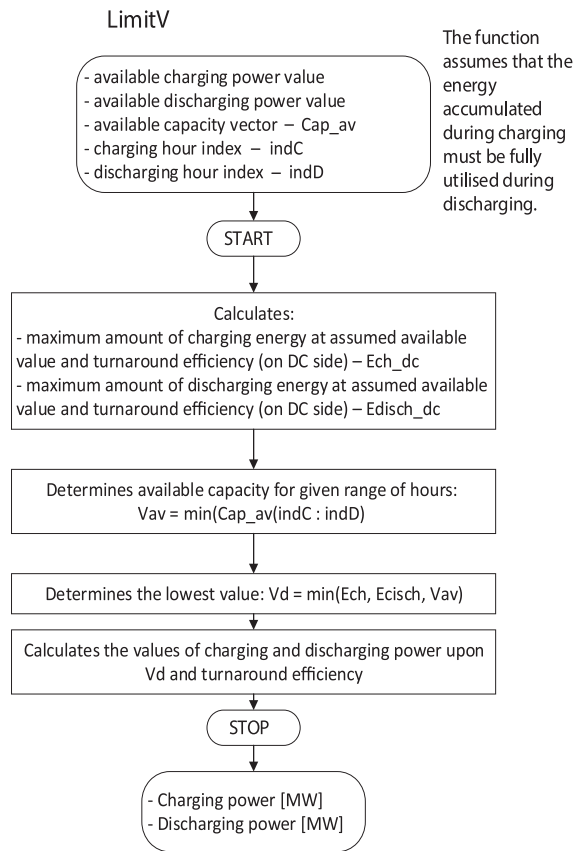


Fig. 4. Algorithm of the function which determines the charging-discharging power values

## 5. Criteria for choosing primary parameters of the storage – technical and economic optimisation indexes

The results reveal that the most important parameters are operating profit and lifetime. Other values are of secondary importance. Therefore, the optimisation criteria are:

- operating profit – difference between the revenues from electricity sales and the cost of electricity procurement at lower prices. It is calculated using the storage operating schedule and the electricity prices vector. It takes into account the turnaround efficiency
- lifetime – lifetime period. It determines the number of battery replacement operations within the assumed operating period.

## 6. Conclusions

In the case of using the storage for the programmed operation (arbitration), the operating profit is proportional to the total capacity of the storage system. This is due to the fact that the higher the total capacity gets, the more energy may be purchased at lower prices and sold at higher<sup>8</sup>. Determination of the total storage capacity will therefore be dictated by the possibility of connecting a certain capacity to the grid, capital cost and financial capabilities of the investor<sup>9</sup>. The profit generation capability is influenced by  $P_{ch}/Q$ ,  $P_{disch}/Q$  i  $\eta_{cycle}$ . The higher the relative power values are, the greater the possibilities of executing a cycle at the best possible hours using available capacity become. However, these should not be higher than 1. Turnaround efficiency affects the number of feasible cycles which can be executed. Based on the results presented in Tab. 4 it may be concluded that the operating profit threshold of 100 PLN/MWh is too high, as for every technology this yields low relative operating time, with the capacity utilisation factor of 22% or less.

Relative operating profit threshold = 30 PLN/MWh,  $Q_n = 10$  MWh

| Qu/Qn % | NaS                            |                         |                               |                        |             |                               |                | Li-ion                         |                         |                               |                        |             |                               |                | PbAcid                         |                         |                               |                        |             |                               |                |
|---------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|
|         | Operating profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years | Operating profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years | Operating profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years |
| 10      | 98.7                           | 0.87                    | 1,280                         | 77                     | 100         | 87                            | > 20           | 135.5                          | 0.99                    | 1,560                         | 86.82                  | 100         | 99                            | > 20           | 59.5                           | 0.59                    | 814                           | 73.15                  | 100         | 58.86                         | > 20           |
| 20      | 189.2                          | 0.87                    | 2,505                         | 76                     | 100         | 85                            | > 20           | 271.0                          | 0.99                    | 3,121                         | 86.82                  | 100         | 99                            | > 20           | 118.4                          | 0.59                    | 1,618                         | 73.14                  | 100         | 58.51                         | > 20           |
| 30      | 270.9                          | 0.87                    | 3,671                         | 74                     | 100         | 83                            | > 20           | 406.5                          | 0.99                    | 4,681                         | 86.82                  | 100         | 99                            | > 20           | 175.2                          | 0.59                    | 2,396                         | 73.13                  | 100         | 57.75                         | > 20           |
| 40      | 335.5                          | 0.87                    | 4,706                         | 71                     | 100         | 80                            | > 20           | 541.9                          | 0.99                    | 6,242                         | 86.82                  | 100         | 99                            | > 20           | 230.1                          | 0.59                    | 3,148                         | 73.08                  | 100         | 56.90                         | 20             |
| 50      | 390.2                          | 0.87                    | 5,625                         | 69                     | 100         | 76                            | > 20           | 677.4                          | 0.99                    | 7,802                         | 86.82                  | 100         | 99                            | 16             | 279.1                          | 0.59                    | 3,830                         | 72.87                  | 100         | 55.38                         | 16             |
| 60      | 429.0                          | 0.87                    | 6,323                         | 68                     | 100         | 72                            | > 20           | 812.9                          | 0.99                    | 9,363                         | 86.82                  | 100         | 99                            | 11             | 318.8                          | 0.59                    | 4,395                         | 72.54                  | 100         | 52.96                         | 13             |
| 70      | 453.5                          | 0.87                    | 6,811                         | 67                     | 100         | 66                            | 17.5           | 948.4                          | 0.99                    | 10,923                        | 86.82                  | 100         | 99                            | 8              | 357.4                          | 0.59                    | 4,942                         | 72.33                  | 100         | 51.05                         | 11             |
| 80      | 469.3                          | 0.87                    | 7,134                         | 66                     | 100         | 60                            | 14             | 1,083.9                        | 0.99                    | 12,484                        | 86.82                  | 100         | 99                            | 6.8            | 388.9                          | 0.59                    | 5,370                         | 72.42                  | 100         | 48.54                         | 9.8            |
| 90      | 474.5                          | 0.87                    | 7,230                         | 66                     | 100         | 55                            | 11.7           | 1,219.4                        | 0.99                    | 14,044                        | 86.82                  | 100         | 99                            | 5.5            | 418.5                          | 0.59                    | 5,766                         | 72.58                  | 100         | 46.32                         | 8.7            |
| 100     | 476.8                          | 0.87                    | 7,268                         | 66                     | 100         | 49                            | 9.89           | 1,354.0                        | 0.99                    | 15,598                        | 86.80                  | 100         | 99                            | 4              | 438.1                          | 0.59                    | 6,031                         | 72.64                  | 100         | 43.61                         | 7.8            |

<sup>8</sup> This is caused by the fact that the increase of nominal capacity implicates proportional growth of maximum charging and discharging power values. This proportionally increases charging and discharging energy. Schedules of storage systems of the same type with different nominal capacities and at the same  $Q_u/Q_n$ , will feature proportional power values.

<sup>9</sup> This should be a subject of a separate detailed techno-economic study for a specific case.



Relative operating profit threshold = 100 PLN/MWh,  $Q_n = 10$  MWh

| Qu/Qn % | NaS                            |                         |                               |                        |             |                               |                | Li-ion                         |                         |                               |                        |             |                               |                | PbAcid                         |                         |                               |                        |             |                               |                |
|---------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|
|         | Operating profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years | Operating profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years | Operating profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years |
| 10      | 34.8                           | 0.14                    | 207                           | 168                    | 100         | 14                            | > 20           | 54.4                           | 0.22                    | 347                           | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 22.4                           | 0.09                    | 126                           | 177.28                 | 100         | 9.14                          | > 20           |
| 20      | 65.0                           | 0.14                    | 383                           | 169                    | 100         | 13                            | > 20           | 108.7                          | 0.22                    | 694                           | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 44.6                           | 0.09                    | 251                           | 177.53                 | 100         | 9.09                          | > 20           |
| 30      | 90.1                           | 0.14                    | 528                           | 171                    | 100         | 12                            | > 20           | 163.1                          | 0.22                    | 1,041                         | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 66.4                           | 0.09                    | 373                           | 178.06                 | 100         | 8.98                          | > 20           |
| 40      | 106.4                          | 0.14                    | 627                           | 170                    | 100         | 11                            | > 20           | 217.4                          | 0.22                    | 1,388                         | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 87.5                           | 0.09                    | 490                           | 178.48                 | 100         | 8.86                          | > 20           |
| 50      | 118.9                          | 0.14                    | 706                           | 168                    | 100         | 10                            | > 20           | 271.8                          | 0.22                    | 1,735                         | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 106.5                          | 0.09                    | 596                           | 178.77                 | 100         | 8.62                          | > 20           |
| 60      | 126.4                          | 0.14                    | 756                           | 167                    | 100         | 9                             | > 20           | 326.1                          | 0.22                    | 2,082                         | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 122.4                          | 0.09                    | 684                           | 178.90                 | 100         | 8.25                          | > 20           |
| 70      | 129.3                          | 0.14                    | 776                           | 167                    | 100         | 8                             | > 20           | 380.5                          | 0.22                    | 2,429                         | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 138.0                          | 0.09                    | 771                           | 178.99                 | 100         | 7.97                          | > 20           |
| 80      | 131.3                          | 0.14                    | 790                           | 166                    | 100         | 7                             | > 20           | 434.8                          | 0.22                    | 2,776                         | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 152.2                          | 0.09                    | 851                           | 178.87                 | 100         | 7.69                          | > 20           |
| 90      | 132.6                          | 0.14                    | 800                           | 166                    | 100         | 6                             | > 20           | 489.2                          | 0.22                    | 3,123                         | 156.64                 | 100         | 22                            | > 20           | 166.0                          | 0.09                    | 929                           | 178.76                 | 100         | 7.46                          | > 20           |
| 100     | 133.2                          | 0.14                    | 805                           | 165                    | 100         | 5                             | > 20           | 543.1                          | 0.22                    | 3,467                         | 156.66                 | 100         | 22                            | 18.4           | 175.1                          | 0.09                    | 984                           | 177.94                 | 100         | 7.12                          | > 20           |

Relative operating profit threshold = 70 PLN/MWh,  $Q_n = 10$  MWh

| 21.737 | NaS                      |                         |                               |                        |             |                               |                | Li-ion                   |                         |                               |                        |             |                               |                | PbAcid                   |                         |                               |                        |             |                               |                |
|--------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|
|        | Op. profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years | Op. profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years | Op. profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years |
| 10     | 60.7                     | 0.36                    | 523                           | 116.13                 | 100         | 35.5                          | > 20           | 99.5                     | 0.57                    | 888                           | 112.10                 | 100         | 57.0                          | > 20           | 32.9                     | 0.18                    | 255                           | 129.31                 | 100         | 18.4                          | > 20           |
| 20     | 112.4                    | 0.36                    | 963                           | 116.78                 | 100         | 32.7                          | > 20           | 199.1                    | 0.57                    | 1,776                         | 112.10                 | 100         | 57.0                          | > 20           | 65.5                     | 0.18                    | 505                           | 129.57                 | 100         | 18.3                          | > 20           |
| 30     | 154.4                    | 0.36                    | 1,314                         | 117.51                 | 100         | 29.8                          | > 20           | 298.6                    | 0.57                    | 2,664                         | 112.10                 | 100         | 57.0                          | > 20           | 97.0                     | 0.18                    | 745                           | 130.15                 | 100         | 18.0                          | > 20           |
| 40     | 182.7                    | 0.36                    | 1,561                         | 117.10                 | 100         | 26.5                          | > 20           | 398.1                    | 0.57                    | 3,552                         | 112.10                 | 100         | 57.0                          | > 20           | 127.4                    | 0.18                    | 976                           | 130.59                 | 100         | 17.6                          | > 20           |
| 50     | 204.1                    | 0.36                    | 1,747                         | 116.79                 | 100         | 23.7                          | > 20           | 497.7                    | 0.57                    | 4,440                         | 112.10                 | 100         | 57.0                          | > 20           | 154.4                    | 0.18                    | 1,179                         | 131.00                 | 100         | 17.0                          | > 20           |
| 60     | 217.7                    | 0.36                    | 1,873                         | 116.24                 | 100         | 21.2                          | > 20           | 597.2                    | 0.57                    | 5,328                         | 112.10                 | 100         | 57.0                          | 19             | 175.6                    | 0.18                    | 1,332                         | 131.80                 | 100         | 16.1                          | > 20           |
| 70     | 223.7                    | 0.36                    | 1,931                         | 115.82                 | 100         | 18.7                          | > 20           | 696.7                    | 0.57                    | 6,216                         | 112.10                 | 100         | 57.0                          | 14.4           | 196.3                    | 0.18                    | 1,481                         | 132.55                 | 100         | 15.3                          | > 20           |
| 80     | 227.4                    | 0.36                    | 1,968                         | 115.60                 | 100         | 16.7                          | > 20           | 796.3                    | 0.57                    | 7,103                         | 112.10                 | 100         | 57.0                          | 12             | 214.2                    | 0.18                    | 1,607                         | 133.29                 | 100         | 14.5                          | > 20           |
| 90     | 229.3                    | 0.36                    | 1,985                         | 115.51                 | 100         | 15.0                          | > 20           | 895.8                    | 0.57                    | 7,991                         | 112.10                 | 100         | 57.0                          | 9.6            | 231.5                    | 0.18                    | 1,728                         | 133.97                 | 100         | 13.9                          | > 20           |
| 100    | 230.3                    | 0.36                    | 1,994                         | 115.49                 | 100         | 13.5                          | > 20           | 994.3                    | 0.57                    | 8,868                         | 112.11                 | 100         | 57.0                          | 7.2            | 242.9                    | 0.18                    | 1,811                         | 134.12                 | 100         | 13.1                          | > 20           |

Relative operating profit threshold = 15 PLN/MWh,  $Q_n = 10$  MWh

| Qu/Qn % | NaS                      |                         |                               |                        |             |                               |                | Li-ion                   |                         |                               |                        |             |                               |                | PbAcid                   |                         |                               |                        |             |                               |                |
|---------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|
|         | Op. profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years | Op. profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years | Op. profit, thousand PLN | Relative operating time | Electricity fed into grid MWh | Average profit PLN/MWh | $E_{max}$ % | Capacity utilisation factor % | Lifetime years |
| 10      | 102.3                    | 0.97                    | 1,435                         | 71.29                  | 100         | 97.0                          | > 20           | 138.0                    | 1                       | 1,683                         | 82.01                  | 100         | 100.0                         | > 20           | 65.7                     | 0.78                    | 1,081                         | 60.77                  | 100         | 78.1                          | > 20           |
| 20      | 197.2                    | 0.97                    | 2,849                         | 69.22                  | 100         | 96.4                          | > 20           | 276.1                    | 1                       | 3,367                         | 82.01                  | 100         | 100.0                         | > 20           | 130.6                    | 0.78                    | 2,153                         | 60.68                  | 100         | 77.8                          | > 20           |
| 30      | 284.0                    | 0.97                    | 4,237                         | 67.02                  | 100         | 95.6                          | > 20           | 414.1                    | 1                       | 5,050                         | 82.01                  | 100         | 100.0                         | > 20           | 193.6                    | 0.78                    | 3,201                         | 60.48                  | 100         | 77.1                          | > 20           |
| 40      | 354.9                    | 0.97                    | 5,544                         | 64.01                  | 100         | 93.9                          | > 20           | 552.2                    | 1                       | 6,733                         | 82.01                  | 100         | 100.0                         | > 20           | 254.5                    | 0.78                    | 4,224                         | 60.26                  | 100         | 76.3                          | 15             |
| 50      | 417.1                    | 0.97                    | 6,789                         | 61.44                  | 100         | 92.0                          | > 20           | 690.2                    | 1                       | 8,416                         | 82.01                  | 100         | 100.0                         | 15.2           | 309.9                    | 0.78                    | 5,193                         | 59.68                  | 100         | 75.1                          | 12             |
| 60      | 466.3                    | 0.97                    | 7,951                         | 58.65                  | 100         | 89.8                          | 19.9           | 828.3                    | 1                       | 10,100                        | 82.01                  | 100         | 100.0                         | 10.2           | 356.4                    | 0.78                    | 6,059                         | 58.82                  | 100         | 73.0                          | 10             |
| 70      | 500.7                    | 0.97                    | 8,901                         | 56.25                  | 100         | 86.2                          | 15.6           | 966.3                    | 1                       | 11,783                        | 82.01                  | 100         | 100.0                         | 7.6            | 401.7                    | 0.78                    | 6,903                         | 58.19                  | 100         | 71.3                          | 8.5            |
| 80      | 524.2                    | 0.97                    | 9,585                         | 54.69                  | 100         | 81.2                          | 12.6           | 1,104.3                  | 1                       | 13,466                        | 82.01                  | 100         | 100.0                         | 6.3            | 439.6                    | 0.78                    | 7,622                         | 57.67                  | 100         | 68.9                          | 7.4            |
| 90      | 532.5                    | 0.97                    | 9,826                         | 54.19                  | 100         | 74.0                          | 10.4           | 1,242.4                  | 1                       | 15,149                        | 82.01                  | 100         | 100.0                         | 5              | 475.3                    | 0.78                    | 8,297                         | 57.29                  | 100         | 66.7                          | 6.5            |
| 100     | 536.0                    | 0.97                    | 9,920                         | 54.03                  | 100         | 67.2                          | 8.8            | 1,379.3                  | 1                       | 16,815                        | 82.03                  | 100         | 100.0                         | 3.8            | 499.6                    | 0.78                    | 8,770                         | 56.96                  | 100         | 63.4                          | 5.9            |

Tab. 4. Results of the simulation of storage operation at variable usable capacity and relative operating profit threshold of 15 PLN/MWh, 30 PLN/MWh, 70 PLN/MWh and 100 PLN/MWh

This means that at such a threshold value the algorithm was unable to find many solutions which would meet imposed restrictions. This results in a long lifetime. Relative operating time depends on the relative profit threshold value, but it does not depend on the useful-to-nominal capacity ratio. In the case of the Li-ion technology, the capacity utilisation factor also does not depend on  $Q_u/Q_n$ . For other technologies, it drops if the  $Q_u/Q_n$  ratio grows. Capacity in relation to the charging and discharging power was not observed to be high, i.e. a certain part of capacity was never used during simulation ( $E_{\max} = 100\%$ ). In the case of the threshold value of 15 PLN/MWh, a clear impact of the depth of discharge ( $Q_u/Q_n$ ) on lifetime can be observed.

The main criterion is operating profit, but at a preserved lifetime, e.g. with battery replacement every five years. The capacity utilisation factor expresses the intensity of storage operation. Moreover, as the relative operating profit threshold value grows, so does the average profit, as the cycles of lower relative profits are not accepted then. Regardless of simulation parameters, the Li-ion storage systems prove to have the highest capacity utilisation factors and operating profits. Among all obtained results,

the optimal solution is the Li-ion storage with  $Q_u/Q_n = 90\%$  and relative profit threshold of 30 PLN/MWh. In the case of the 15 PLN/MWh threshold, the profit does not grow significantly. It is a typical problem of a multi-objective Pareto optimisation. Evolutionary algorithms with niching may be used for this purpose [1]. After obtaining a Pareto front, one solution needs to be selected using any method or criterion, e.g. operating profit maximisation. The next stage then involves investigating the possibilities of effective application of evolutionary algorithms to optimise operating profit and lifetime using the relative profit threshold,  $Q_u/Q_n$  and technology type.

## REFERENCES

1. T. Białaszewski, "Wielokryterialna optymalizacja parametryczna układów z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych" [Multi-objective parametric optimisation of systems using evolutionary algorithms], Pomorskie Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Gdańsk, 2007.

---

## Jarosław Korpikiewicz

Institute of Power Engineering, Gdańsk Division

e-mail: j.korpikiewicz@ien.gda.pl

Completed studies in automation and robotics at the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology (2002). His professional interest includes: design of electrical power system facilities, quality of electrical power supply, ancillary and regulation services, issues of power system operation, automation systems of power plants and the power system, and application of renewable energy sources. Additionally, his activities involve technical IT systems, i.e. analysing and creating IT systems intended for electrical power engineering and automation. PhD student at the Department of Ship Automation, Gdynia Maritime University.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 56–62. When referring to the article please refer to the original text.

PL

# Optymalny dobór parametrów elektrochemicznego magazynu energii

## Autor

Jarosław Korpikiewicz

## Słowa kluczowe

magazyn energii, optymalizacja, Smart Grid

## Streszczenie

Obecnie coraz częściej sygnalizowana jest możliwość wykorzystania magazynów energii w SEE. Tryb pracy lub sposób wykorzystania został nazwany „strategią wykorzystania magazynu”. W artykule wybrano jedną z nich – pracę programową. Opisano algorytm sterowania nadrzędnego magazynem dla wybranej strategii. Przedstawiono wyniki symulacji. Inwestor może mieć dylemat, jak dobrać parametry magazynu pracującego w danej strategii. Na podstawie wyników symulacji wyznaczono techniczno-ekonomiczne wskaźniki optymalizacji. Opracowano schemat doboru mocy i pojemności całkowitej magazynu dla wybranej strategii, z uwzględnieniem różnych typów elektrochemicznych magazynów, przy ustalonej wartości pojemności użytkowej. Rozpatrywanym problemem optymalizacyjnym jest ustalenie kompromisu pomiędzy żywotnością magazynu a jego efektywnym wykorzystaniem.

## 1. Wstęp

Problem doboru parametrów magazynu przyłączonego do SEE jest złożony. W celu jego rozwiązania należy określić parametry techniczno-eksploatacyjne magazynu energii, wybrać jego strategię wykorzystania. Dla tej strategii należy opracować algorytm optymalizacyjny ustalający harmonogram pracy magazynu, określony wartościami mocy ładowania/rozładowania w poszczególnych godzinach. Umożliwia to wykonanie symulacji pracy magazynu. W celu realizacji symulacji przygotowano dane wejściowe – ceny energii elektrycznej (TGE SA) za dany okres.

Poniżej w tab. 1 przedstawiono definicję parametrów magazynu energii wykorzystywanego w SEE. W tab. 2 przedstawiono wartości tych parametrów dla różnych technologii. W danej technologii jest wiele odmian konstrukcji ogniw oraz użytych materiałów. Dlatego część parametrów została przedstawiona jako przedziały wartości. Wartości pogrubione zostały przyjęte do symulacji. Porównując parametry techniczne różnych technologii, możemy stwierdzić, że najmniejszą sprawnością i żywotnością cechują się ogniwa kwasowo-ołowiowe (do analizy przyjęto wersje przemysłowe tych ogniw, ponieważ zwykle nie nadają się do tych zastosowań<sup>1</sup>

np. ogniwa z płytą pancerną). Są one atrakcyjnie cenowo i dlatego często wykorzystywane w UPS (mała wymagana liczba cykli). Ogniwa litowo-jonowe<sup>2</sup> odznaczają się dużymi mocami ładowania i rozładowania, co może być przydatne np. do wyrównywania obciążeń oraz arbitrażu. Ogniwa NaS mogą mieć zastosowanie w strategiach, w których głównym parametrem użytkowym jest pojemność. Na rys. 1 przedstawiono charakterystykę żywotności (liczbę cykli) magazynu, w zależności od głębokości rozładowania (DOD). Liczba cykli ściśle zależy od głębokości rozładowania i technologii magazynu. Wadą elektrochemicznych magazynów energii jest znaczny spadek

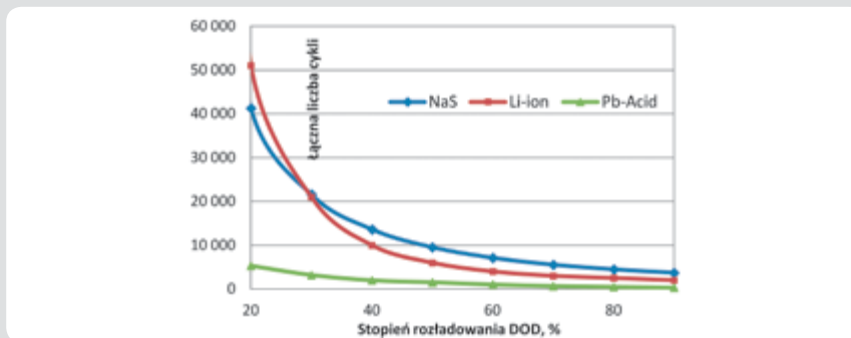
| Lp. | Nazwa parametru                                                                     | Opis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Pojemność całkowita (nominalna) zasobnika $Q_n$                                     | Ilość energii możliwej do zgromadzenia w zasobniku, wyrażona w MWh                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 2   | Pojemność użytkowa zasobnika $Q_u$                                                  | Wykorzystywana część pojemności całkowitej zasobnika dla realizacji danej strategii, w MWh. Niekiedy wygodniej operować jest ilorazem $Q_u/Q_n$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 3   | Stopień rozładowania zasobnika energii <b>DOD</b> (ang. <i>Depth of Discharge</i> ) | Głębokość stanu rozładowania zasobnika, wyrażony w % pojemności nominalnej (całkowitej). Stopień naładowania zasobnika jest parametrem komplementarnym, tj. $SOC = 100\% - DOD$ , w %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 4   | Sprawność cyklu magazynowania energii $\eta_{cyklu}$                                | Sprawność pełnego cyklu ładowania i rozładowania zasobnika energii zdefiniowana następująco (przyjęto sterowanie mocą z rozdzielczością godzinową): $\eta_{cyklu} = \frac{\text{energia oddana do sieci}}{\text{energia pobrana z sieci}} = \frac{\sum_{g=1}^r P_{rozl,g} \cdot t_g}{\sum_{d=1}^l P_{lad,d} \cdot t_d} \quad (1)$ gdzie: $P_{rozl,g}$ – moc oddawana do sieci [MW] w czasie $t_g$ [h]<br>$r$ – liczba godzin rozładowania, $l$ – liczba godzin ładowania<br>$P_{lad,d}$ – moc pobierana z sieci [MW] w czasie $t_d$ [h] |
| 5   | Charakterystyka czasu życia zasobnika                                               | Maksymalna liczba cykli ładowania / rozładowania zasobnika w całym okresie jego eksploatacji, w zależności od stopnia rozładowania DOD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 6   | Maksymalna moc ładowania $P_{lad}$                                                  | Maksymalna moc ciągła, którą magazyn można ładować. Wartość mierzona od strony prądu przemiennego, MW                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 7   | Maksymalna moc rozładowania $P_{rozl}$                                              | Maksymalna moc ciągła, którą magazyn można rozładowywać. Wartość mierzona od strony prądu przemiennego, MW                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Tab. 1. Definicja podstawowych parametrów technicznych i eksploatacyjnych magazynów energii

<sup>1</sup> Zwykle ogniwa kwasowo-ołowiowe mają żywotność ok. 3200 cykli przy DOD = 30%. Parametry pozostałych ogniw przyjęto jako typowe, tj. w wykonaniu standardowym.

<sup>2</sup> Ogniwa litowo-jonowe cechują się bardzo dużą gęstością magazynowania energii (zarówno masową, jak i objętościową). Dlatego chętnie wykorzystywane są w urządzeniach przenośnych, np. laptopach.





Rys. 1. Charakterystyka żywotności magazynu w zależności od głębokości rozładowania

| Parametr                                        | NaS             | Li-ion        | PbAcid           |
|-------------------------------------------------|-----------------|---------------|------------------|
|                                                 | sodowo-siarkowe | litowo-jonowe | kwasowo-ołowiowe |
| Moc We/Wy [MW]                                  | 1/1             | 1/3           | 1/2              |
| Stosunek pojemność zasobnika / moc rozładowania | 6÷7,2           | 0,33÷4        | 2÷3<br>2,5       |
| Sprawność cyklu magazynowania energii [%]       | 85÷90           | 90÷95         | 75÷85            |
| Czas życia [cykle] przy 80% DOD                 | 4500            | 2500÷3500     | 1000÷2000        |
| Czas życia [cykle] przy 100% DOD                | 3000            | 1500÷2000     | 500÷1500         |

Tab. 2. Parametry techniczne magazynów elektrochemicznych

ich żywotności przy wzroście wartości głębokości rozładowania. Praca magazynu z mniejszymi głębokościami rozładowania powoduje, że dla celów użytkowych wykorzystana zostaje tylko część całkowitej pojemności magazynu równej wartościowo głębokości rozładowania. Przykładowo stosując maksymalny stopień rozładowania 30%, przy którym żywotność magazynów NaS i Li-ion wynosi ok. 20 tys. cykli, to 70% pojemności całkowitej nie będzie wykorzystana w strategii. Zatem żywotność oraz możliwość pełnego wykorzystania magazynu są cechami wzajemnie sprzecznymi. Aby zbadać możliwości zastosowania magazynów energii w SEE, należy zdefiniować sposób pracy (rolę) magazynu określoną jako strategię wykorzystania, opracować algorytm pracy (sterowania) magazynu pracującego w danej strategii oraz przeprowadzić symulację.

**2. Strategie wykorzystania magazynów energii w sieciach elektroenergetycznych**  
Strategią nazywamy tryb pracy lub sposób wykorzystania zasobników energii w sieciach elektroenergetycznych. Pewne strategie mają zastosowanie techniczne, inne rynkowe. Poniżej przedstawiono dwie popularne strategie:

- **praca programowa** – strategia realizowana przy zmiennych stawkach energii w ciągu doby w celu redukcji zapotrzebowania energii w okresach wysokich

cen energii oraz wzrostu zapotrzebowania w okresach niższych cen energii. Wykorzystując magazyn, można przemieścić część zapotrzebowania w czasie, redukując koszty za energię elektryczną

- **wyrównanie dobowej zmienności obciążeń** – strategia polega również na przesuwaniu zapotrzebowania w czasie, lecz głównym celem nie są aspekty ekonomiczne, ale techniczne. Przesuwanie części zapotrzebowania z okresów szczytowych na okresy dolinowe zmniejsza wymaganą moc szczytową – umożliwia zredukowanie wykorzystania kosztownych jednostek szczytowych, dodatkowych uruchomień bloków czy też dociążenie bloków systemowych w okresach dolinowych. Korzyścią wtórną jest nieznaczna redukcja strat mocy spowodowana redukcją mocy szczytowych. Korzyści będą większe przy znacznym zróżnicowaniu dobowego zapotrzebowania.

### 3. Algorytm sterowania – praca programowa

W celu realizacji strategii pracy programowej, zwanej również arbitrażem, opracowano algorytm, uwzględniając ograniczenie na pojemność, moc ładowania, moc rozładowania oraz przyjęto typowe wartości parametrów dla ogniw ołowiowo-kwasowych, litowo-jonowych oraz NaS (tab. 3).

Do przeprowadzania analiz wykorzystano rzeczywiste ceny energii elektrycznej zanotowane na Towarowej Giełdzie Energii SA (TGE), na podstawie Rynku Dnia Następnego (RDN) w latach 2009–2013. Sesje na Rynku Dnia Następnego występują z rozdzielczością godzinową. W algorytmie założono, że znany jest wektor cen na dobę następną – wówczas opracowany zostaje harmonogram, tj. wektor mocy magazynu dla poszczególnych godzin następnej doby. Z powyższego wynikają następujące założenia algorytmu:

- okres podstawowy optymalizacji – 24 h, tzn. bilans energetyczny wyznaczany jest w ciągu jednej doby, tj. cała zgromadzona energia musi zostać wykorzystana w ramach tej samej doby. Zapobiega to lawinowemu gromadzeniu się energii w ciągu dłuższego czasu, np. tygodnia
- dane wejściowe: 24-godzinny wektor cen energii elektrycznej, parametry magazynu
- optymalizowany jest harmonogram pracy magazynu ze względu na zysk operacyjny<sup>3</sup>.

Algorytm został zrealizowany w środowisku Matlab. Funkcja *Analiza* wczytuje dane o cenach z pliku MS Excel, posiada ustalone parametry magazynu dla danej technologii i uruchamia dla każdej doby funkcję *Opt* oraz zapisuje wyniki do innego pliku MS Excel. Funkcja *Opt* jest funkcją optymalizacyjną wyznaczającą harmonogram o największym zysku operacyjnym, której struktura została przedstawiona na rys. 2. Funkcja kontroluje dostępność zasobów mocy ładowania/rozładowania oraz pojemności i jeżeli są one dostępne, wywołuje iteracyjnie funkcję *WyznaczCykl*. Kontrola zasobów mocy i pojemności polega na sukcesywnym ich zmniejszaniu w miarę wykorzystywania kolejnych par godzin dla cykli ładowania-rozładowania zasobnika. Początkowy zerowy wektor mocy magazynu jest aktualizowany dla wykorzystanej pary godzin pracy zasobnika. Analogicznie kontrolowany jest stopień naładowania części użytkowej zasobnika i niedopuszczalne są operacje powodujące zmianę jego wartości powyżej 100% lub poniżej 0% w trakcie lub na koniec doby. Algorytm funkcji *WyznaczCykl* przedstawiono na rys. 3. Jej zadaniem jest znalezienie najlepszej pojedynczej pary godzin (przynoszącej największy zysk operacyjny, względny dla wszystkich możliwych kombinacji godzin ładowania i rozładowania zasobnika) przy założonych ograniczeniach, tzn. spośród wszystkich dostępnych kombinacji par godzin ładowania i rozładowania w obrębie doby znajdowana jest para:

- nienaruszająca ograniczeń technicznych (dostępność w danych godzinach mocy na ładowanie i rozładowanie zasobnika oraz nieprzekroczenie założonej pojemności zasobnika)
- charakteryzująca się największym zyskiem względnym określonym wzorem 2
- względny zysk operacyjny określony wzorem 2 jest równy lub większy od wartości granicznej.

Wprowadzony został parametr zysk graniczny względny. Dla każdej pojedynczej operacji ładowania i rozładowania zysk operacyjny względny ma postać (wzór 2):

<sup>3</sup> Zysk operacyjny stanowi różnicę pomiędzy kwotą uzyskaną ze sprzedaży energii a kwotą wydaną na jej zakup. Uwzględnia sprawność cyklu, tzn. ilość energii wymaganej do zakupu jest 1/η razy większa od energii sprzedanej.

$$zysk_{wz} = \frac{ceny_r(indR) \cdot P_{rozl} - ceny_l(indL) \cdot P_{lad}}{P_{rozl} \cdot 1h} \quad (2)$$

gdzie:

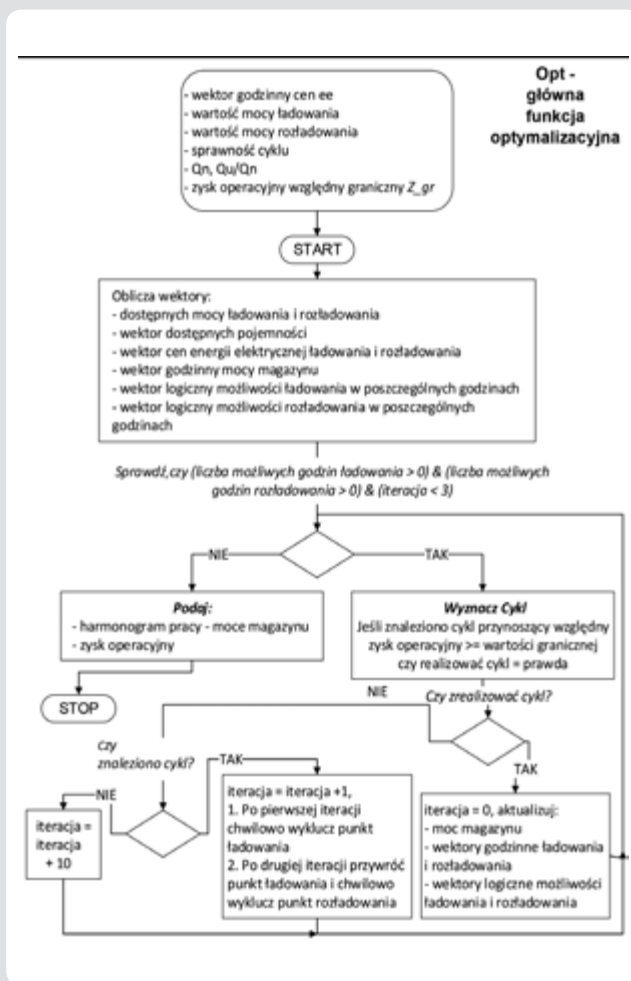
indR – nr godziny rozładowania; indL – nr godziny ładowania;  $P_{rozl}$  – wartość mocy rozładowania wyznaczona przez funkcję *OgraniczV* MW;  $P_{lad}$  – wartość mocy ładowania wyznaczona przez funkcję *OgraniczV* MW;  $ceny_r$  – dobowy wektor cen dla rozładowania ze zmodyfikowanymi wartościami na 0 dla godzin, dla których limit mocy rozładowania został wyczerpany lub dla kilku cykli algorytm nie znalazł zysku z udziałem tej godziny;  $ceny_l$  – dobowy wektor cen dla ładowania ze zmodyfikowanymi wartościami, bardzo dużymi dla godzin, dla których limit mocy ładowania został wyczerpany lub dla kilku cykli algorytm nie znalazł zysku z udziałem tej godziny.

Funkcja jest wykonywana iteracyjnie aż do wyczerpania wszystkich par godzin ładowania i rozładowania zapewniających zysk operacyjny względny o wartości równej co najmniej wartości granicznej, przy założonej sprawności cyklu. Względny zysk

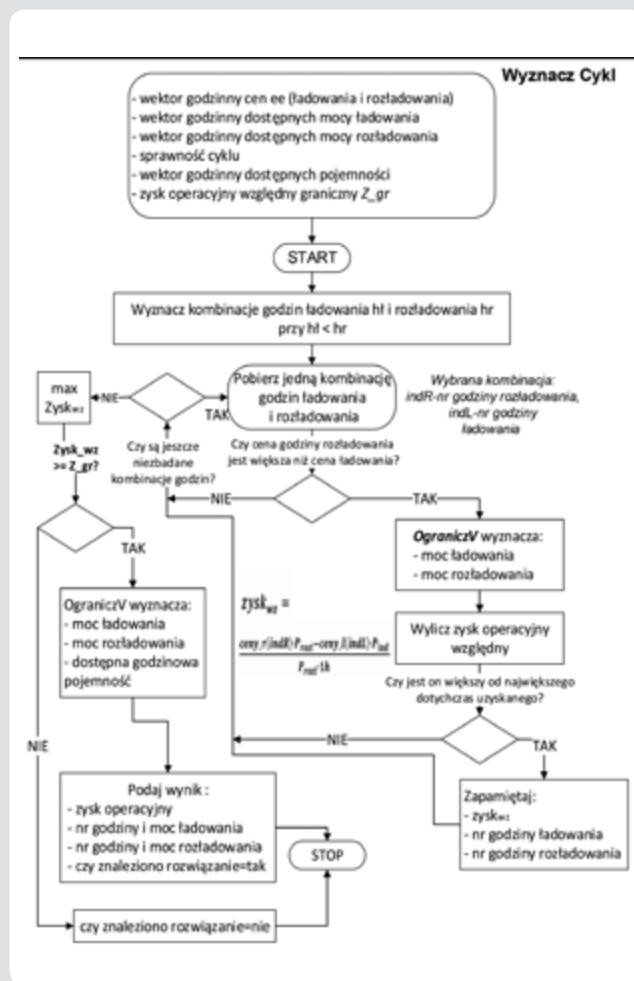
operacyjny ma za zadanie zapewnienie minimalnych wymaganych przychodów z operacji ładowanie-rozładowanie zasobnika w celu pokrycia kosztów CAPEX i OPEX w całym okresie życia zasobnika. Ponadto eliminuje realizację cykli ładowania-rozładowania o bardzo niskim zysku operacyjnym. W pierwszej symulacji przyjęto zysk graniczny względny 70 zł/MWh<sup>4</sup>. Podczas wyznaczania pojedynczej pary ładowania-rozładowania moce muszą spełniać wszystkie ograniczenia bilansowe i parametrów magazynu. Jest to realizowane za pomocą funkcji *OgraniczV*, której algorytm został przedstawiony na rys. 4. Wektor dostępnej mocy ładowania i rozładowania jest tworzony w funkcji *Opt* i aktualizowany jest po każdej zatwierdzonej operacji ładowania i rozładowania. Podobnie wyznaczany jest wektor dostępnych pojemności użytkowych. Funkcja *OgraniczV* jest wywoływana, gdy istnieje możliwość wypracowania zysku.

Kolejna symulacja polegała na wyznaczaniu harmonogramu dla różnych ilorazów pojemności użytkowej do pojemności znamionowej  $Q_u/Q_n$  przy  $Q_n = 10$  MWh i różnych wartości względnych zysków granicznych.

Na podstawie wyników wyznaczono sumaryczny zysk operacyjny (różnica pomiędzy kwotą, za którą sprzedano energię, a kwotą wydaną na jej zakup)<sup>5</sup>, względny czas pracy magazynu pracował, do liczby wszystkich dni symulacji. Parametr ten określa intensywność pracy magazynu, tzn. w jakiej części czasu znalazł możliwość wypracowania zysku operacyjnego. Dodatkowo wyznaczono sumę energii oddanej do sieci (sprzedanej) oraz maksymalną energię użytkową zgromadzoną w ciągu całej symulacji Emax. Parametr ten umożliwia ocenę, czy wykorzystano całą pojemność użytkową. Kolejną obliczaną wielkością na podstawie harmonogramu jest żywotność. Wartość współczynnika żywotności równa 1 oznacza stan akumulatorów fabrycznie nowy, a wartość 0 – po całkowitym wyeksploatowaniu (tj. wykonaniu zadanej liczby cykli przy określonym DOD wg charakterystyki żywotności<sup>6</sup>). Uwzględniając okres symulacji i wielkość ubytku żywotności<sup>6</sup> wyznaczamy żywotność (okres żywotności). Analiza uzyskanych wyników tych symulacji powinna wyznaczyć wielkości kryterialne omówione w punkcie 4.



Rys. 2. Struktura głównej funkcji optymalizacyjnej *Opt*



Rys. 3. Algorytm funkcji wyznaczającej cykl ładowania – rozładowania

<sup>4</sup> Wartość dla pierwszej symulacji została przyjęta arbitralnie. W kolejnej jest ona parametrem. Wartość tego parametru zależy do układu cen w badanym okresie.

<sup>5</sup> W zysku operacyjnym nie uwzględniono kosztów eksploatacyjnych.

<sup>6</sup> Wyznaczony jest na podstawie harmonogramu pracy magazynu. Określone są DOD każdego cyklu. Interpolując charakterystykę żywotności, wyznaczmy ubytek żywotności jako różnicę współczynników żywotności przed i po realizacji zadanej harmonogramu.

### OgraniczV

- dostępna wartość mocy ładowania
- dostępna wartość mocy rozładowania
- wektor dostępnych pojemności
- indeks godziny ładowania
- indeks godziny rozładowania

W funkcji założono, że energia zgromadzona podczas ładowania musi być w całości wykorzystana podczas rozładowania

START

Oblicza:  
- maksymalną ilość energii ładowania przy zadanej dostępnej wartości oraz sprawności cyklu (po stronie DC) – Elad\_dc  
- maksymalną ilość energii rozładowania przy zadanej wartości dostępnej oraz sprawności cyklu (po stronie DC) – Erozi\_dc

Wyznacza dostępną pojemność dla danego zakresu godzin:  
 $V_{dost} = \min(Poj\_dostepn, \text{indeks godziny ładowania} : \text{indeks godziny rozładowania})$

Wyznacza najmniejszą wartość:  $V_d = \min(Elad, Erozi, V_{dost})$

Oblicza wartości mocy ładowania i rozładowania na podstawie  $V_d$  i sprawności cyklu

STOP

- Moc ładowania [MW]
- Moc rozładowania [MW]

Rys. 4. Algorytm funkcji wyznaczającej moce ładowania i rozładowania cyklu

Przedmiotem doboru jest: jaka część pojemności całkowitej ma stanowić pojemność użyteczną oraz wartość graniczną zysku względnego. Jeśli pojemność użyteczna będzie stanowić pojemność całkowitą, uzyskamy większy zysk operacyjny, lecz skróćmy żywotność akumulatorów. W przeciwnym wypadku żywotność może być długa, ale zysk operacyjny znacznie mniejszy. Z kolei skrócenie żywotności akumulatorów powoduje wzrost liczby wymian w zadanym okresie eksploatacji, co powoduje wzrost kosztów inwestycyjnych ponoszonych w trakcie eksploatacji.

#### 4. Wyniki symulacji

Pierwszym elementem badań była symulacja arbitrażu dla różnych pojemności znamionowej magazynu dla danych cenowych z lat 2009–2013. Zależność zysku operacyjnego od wartości pojemności znamionowej jest liniowa<sup>7</sup>. Zatem nie może ona być podstawą do optymalizacji wielkości magazynu. Jednak zależność kosztów inwestycyjnych magazynu od jego pojemności całkowitej nie musi być liniowa. Dane takie można otrzymać od potencjalnego wykonawcy. Ponadto należy w nim ująć koszty związane z przyłączeniem magazynu do sieci. Będą one zależne od mocy przyłączeniowej, stanu i dostępności infrastruktury sieciowej w wybranej lokalizacji inwestycji. Informacje te można uzyskać

od operatora sieci elektroenergetycznej, do której magazyn będzie przyłączony. Następnym etapem badań były symulacje, w których dodatkowymi parametrami były: względny zysk graniczny oraz iloraz  $Q_u/Q_n$  i rodzaj akumulatorów. Na podstawie wyników wyznaczono kilka wielkości. Względny czas pracy wyznaczony został jako iloraz liczby dni, w których magazyn pracował, do całkowitej liczby dni. Średni zysk PLN/MWh to iloraz całkowitego zysku operacyjnego do sumy energii oddanej do sieci w danej symulacji.  $E_{max}$  to maksymalna, znormalizowana wartością pojemności użytkowej, energia zgromadzona w magazynie w ciągu całej symulacji. Wielkość oznacza, jaką część pojemności użytkowej wykorzystano chociaż raz. Wyznaczono dla każdej doby maksymalną zgromadzoną energię. Zsumowano je, a wynik podzielono przez iloczyn liczby dni symulacji i pojemności użytkowej. Wynik tych operacji stanowi współczynnik wykorzystania pojemności użytkowej. Określa on średnią względną pojemność użytkową wykorzystywaną podczas symulacji. Żywotność wyznaczono na podstawie wykonanych liczby cykli, ich głębokości rozładowania. Podczas symulacji godzinne wartości energii użytkowej wyznaczane są na podstawie algorytmu opisanego w punkcie 2. A energia całkowita to suma energii użytkowej i stałej wartości  $Q_n - Q_u$ .

| Parametr                       | NaS | Li-ion | PbAcid |
|--------------------------------|-----|--------|--------|
| Pojemność MWh                  | 10  |        |        |
| Maksymalna moc ładowania MW    | 1,4 | 10     | 2      |
| Maksymalna moc rozładowania MW | 1,4 | 30     | 4      |
| Sprawność cyklu %              | 85  | 95     | 75     |

Tab. 3. Parametry techniczne magazynów wykorzystywanych w symulacji

Na podstawie tych wartości energii całkowitej w magazynie wyznaczono liczbę i głębokości rozładowania magazynu. Uwzględniając charakterystykę żywotności magazynu w danej technologii, wyznaczamy ubytek żywotności. Na podstawie ubytku żywotności i czasu trwania symulacji wyznaczono żywotność.

#### 5. Kryteria doboru podstawowych parametrów magazynu – techniczne i ekonomiczne wskaźniki optymalizacji

Na podstawie wyników można zaobserwować, że najważniejszymi parametrami są zysk operacyjny i żywotność. Pozostałe wielkości mają znaczenie drugoplanowe. Zatem wskaźnikami optymalizacji są:

- zysk operacyjny – różnica między przychodem ze sprzedaży energii elektrycznej a kosztami zakupu energii po cenach niższych. Jest wyliczany na podstawie harmonogramu pracy magazynu i wektora cen energii elektrycznej. Uwzględnia on sprawność cyklu
- żywotność – okres żywotności. Wyznacza liczbę wymian akumulatorów w zadanym okresie eksploatacji.

#### 6. Wnioski

W przypadku wykorzystania magazynu do pracy programowej (arbitrażu) zysk operacyjny jest proporcjonalny do wartości pojemności całkowitej magazynu. Jest to spowodowane faktem: im większa pojemność całkowita, tym więcej energii można zakupić po niższym cenie i sprzedać po wyższej<sup>8</sup>. Dobór całkowitej pojemności magazynu będzie zatem podyktowany możliwościami przyłączenia obiektu o danej mocy i jego kosztami, możliwościami finansowymi inwestora<sup>9</sup>. Na możliwość wypracowania zysku mają wpływ  $P_{lad}/Q$ ,  $P_{rozl}/Q$  i  $\eta_{cyklu}$ . Im większe wartości względne mocy, tym większe możliwości wykonania cyklu w najlepszych godzinach, wykorzystując dostępną pojemność. Jednak nie powinny być większe niż 1. Sprawność cyklu ma wpływ na liczbę opłacalnych cykli możliwych do zrealizowania.

Na podstawie wyników przedstawionych w tab. 4 można stwierdzić, że wartość zysku operacyjnego granicznego 100 zł/MWh jest za wysoka, ponieważ w każdej technologii względny czas pracy jest niski oraz współczynnik wykorzystania pojemności jest mniejszy lub równy 22%. Oznacza to,

<sup>7</sup> Przy zmianie pojemności znamionowej jednocześnie proporcjonalnie zmieniały się ograniczenia na maksymalną moc ładowania i rozładowania. Otrzymywano proporcjonalne względem siebie harmonogramy pracy.

<sup>8</sup> Jest to spowodowane tym, że wzrost pojemności znamionowej implikuje proporcjonalny wzrost maksymalnych mocy ładowania i rozładowania. To zwiększa proporcjonalnie energię ładowania i rozładowania. Harmonogramy magazynów tego samego typu o różnych pojemnościach znamionowych, przy takim samym  $Q_u/Q_n$ , będą wykazywały się proporcjonalnością mocy.

<sup>9</sup> To powinno być przedmiotem osobnej szczegółowej ekspertyzy techniczno-ekonomicznej dla danego przypadku.

Względny zysk operacyjny graniczny = 30 zł/MWh,  $Q_n = 10$  MWh

| Qu/Qn % | NaS                     |                     |                             |                    |             |                              |                | Li-ion                  |                     |                             |                    |             |                              |                | PbAcid                  |                     |                             |                    |             |                              |                |
|---------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|------------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|------------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|------------------------------|----------------|
|         | Zysk operacyjny tys. zł | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk zł/MWh | $E_{max}$ % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata | Zysk operacyjny tys. zł | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk zł/MWh | $E_{max}$ % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata | Zysk operacyjny tys. zł | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk zł/MWh | $E_{max}$ % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata |
| 10      | 98,7                    | 0,87                | 1 280                       | 77                 | 100         | 87                           | > 20           | 135,5                   | 0,99                | 1 560                       | 86,82              | 100         | 99                           | > 20           | 59,5                    | 0,59                | 814                         | 73,15              | 100         | 58,86                        | > 20           |
| 20      | 189,2                   | 0,87                | 2 505                       | 76                 | 100         | 85                           | > 20           | 271,0                   | 0,99                | 3 121                       | 86,82              | 100         | 99                           | > 20           | 118,4                   | 0,59                | 1 618                       | 73,14              | 100         | 58,51                        | > 20           |
| 30      | 270,9                   | 0,87                | 3 671                       | 74                 | 100         | 83                           | > 20           | 406,5                   | 0,99                | 4 681                       | 86,82              | 100         | 99                           | > 20           | 175,2                   | 0,59                | 2 396                       | 73,13              | 100         | 57,75                        | > 20           |
| 40      | 335,5                   | 0,87                | 4 706                       | 71                 | 100         | 80                           | > 20           | 541,9                   | 0,99                | 6 242                       | 86,82              | 100         | 99                           | > 20           | 230,1                   | 0,59                | 3 148                       | 73,08              | 100         | 56,90                        | 20             |
| 50      | 390,2                   | 0,87                | 5 625                       | 69                 | 100         | 76                           | > 20           | 677,4                   | 0,99                | 7 802                       | 86,82              | 100         | 99                           | 16             | 279,1                   | 0,59                | 3 830                       | 72,87              | 100         | 55,38                        | 16             |
| 60      | 429,0                   | 0,87                | 6 323                       | 68                 | 100         | 72                           | > 20           | 812,9                   | 0,99                | 9 363                       | 86,82              | 100         | 99                           | 11             | 318,8                   | 0,59                | 4 395                       | 72,54              | 100         | 52,96                        | 13             |
| 70      | 453,5                   | 0,87                | 6 811                       | 67                 | 100         | 66                           | 17,5           | 948,4                   | 0,99                | 10 923                      | 86,82              | 100         | 99                           | 8              | 357,4                   | 0,59                | 4 942                       | 72,33              | 100         | 51,05                        | 11             |
| 80      | 469,3                   | 0,87                | 7 134                       | 66                 | 100         | 60                           | 14             | 1 083,9                 | 0,99                | 12 484                      | 86,82              | 100         | 99                           | 6,8            | 388,9                   | 0,59                | 5 370                       | 72,42              | 100         | 48,54                        | 9,8            |
| 90      | 474,5                   | 0,87                | 7 230                       | 66                 | 100         | 55                           | 11,7           | 1 219,4                 | 0,99                | 14 044                      | 86,82              | 100         | 99                           | 5,5            | 418,5                   | 0,59                | 5 766                       | 72,58              | 100         | 46,32                        | 8,7            |
| 100     | 476,8                   | 0,87                | 7 268                       | 66                 | 100         | 49                           | 9,89           | 1 354,0                 | 0,99                | 15 598                      | 86,80              | 100         | 99                           | 4              | 438,1                   | 0,59                | 6 031                       | 72,64              | 100         | 43,61                        | 7,8            |

Względny zysk operacyjny graniczny = 100 zł/MWh,  $Q_n = 10$  MWh

| Qu/Qn % | NaS                     |                     |                             |                    |             |                              |                | Li-ion                  |                     |                             |                    |             |                              |                | PbAcid                  |                     |                             |                    |             |                              |                |
|---------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|------------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|------------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|------------------------------|----------------|
|         | Zysk operacyjny tys. zł | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk zł/MWh | $E_{max}$ % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata | Zysk operacyjny tys. zł | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk zł/MWh | $E_{max}$ % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata | Zysk operacyjny tys. zł | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk zł/MWh | $E_{max}$ % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata |
| 10      | 34,8                    | 0,14                | 207                         | 168                | 100         | 14                           | > 20           | 54,4                    | 0,22                | 347                         | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 22,4                    | 0,09                | 126                         | 177,28             | 100         | 9,14                         | > 20           |
| 20      | 65,0                    | 0,14                | 383                         | 169                | 100         | 13                           | > 20           | 108,7                   | 0,22                | 694                         | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 44,6                    | 0,09                | 251                         | 177,53             | 100         | 9,09                         | > 20           |
| 30      | 90,1                    | 0,14                | 528                         | 171                | 100         | 12                           | > 20           | 163,1                   | 0,22                | 1 041                       | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 66,4                    | 0,09                | 373                         | 178,06             | 100         | 8,98                         | > 20           |
| 40      | 106,4                   | 0,14                | 627                         | 170                | 100         | 11                           | > 20           | 217,4                   | 0,22                | 1 388                       | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 87,5                    | 0,09                | 490                         | 178,48             | 100         | 8,86                         | > 20           |
| 50      | 118,9                   | 0,14                | 706                         | 168                | 100         | 10                           | > 20           | 271,8                   | 0,22                | 1 735                       | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 106,5                   | 0,09                | 596                         | 178,77             | 100         | 8,62                         | > 20           |
| 60      | 126,4                   | 0,14                | 756                         | 167                | 100         | 9                            | > 20           | 326,1                   | 0,22                | 2 082                       | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 122,4                   | 0,09                | 684                         | 178,90             | 100         | 8,25                         | > 20           |
| 70      | 129,3                   | 0,14                | 776                         | 167                | 100         | 8                            | > 20           | 380,5                   | 0,22                | 2 429                       | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 138,0                   | 0,09                | 771                         | 178,99             | 100         | 7,97                         | > 20           |
| 80      | 131,3                   | 0,14                | 790                         | 166                | 100         | 7                            | > 20           | 434,8                   | 0,22                | 2 776                       | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 152,2                   | 0,09                | 851                         | 178,87             | 100         | 7,69                         | > 20           |
| 90      | 132,6                   | 0,14                | 800                         | 166                | 100         | 6                            | > 20           | 489,2                   | 0,22                | 3 123                       | 156,64             | 100         | 22                           | > 20           | 166,0                   | 0,09                | 929                         | 178,76             | 100         | 7,46                         | > 20           |
| 100     | 133,2                   | 0,14                | 805                         | 165                | 100         | 5                            | > 20           | 543,1                   | 0,22                | 3 467                       | 156,66             | 100         | 22                           | 18,4           | 175,1                   | 0,09                | 984                         | 177,94             | 100         | 7,12                         | > 20           |

że przy takiej wartości granicznej algorytm nie był w stanie znaleźć wielu rozwiązań spełniających ograniczenia. Co skutkuje wysoką żywotnością. Względny czas pracy jest zależny od wartości granicznego zysku względnego, lecz nie zależy od tego, jaką część pojemności znamionowej stanowi pojemność użytkowa. W przypadku technologii Li-ion współczynnik wykorzystania pojemności również nie zależy od  $Q_u/Q_n$ . Natomiast w pozostałych technologiach maleje on wraz ze wzrostem  $Q_u/Q_n$ . Natomiast nie zaobserwowano zbyt dużej pojemności w stosunku do mocy ładowania i rozładowania, tzn. że pewna część pojemności nigdy nie była wykorzystywana w trakcie symulacji ( $E_{max} = 100\%$ ). W przypadku wartości granicznej 15 zł/MWh

widać wyraźny wpływ głębokości rozładowania ( $Q_u/Q_n$ ) na żywotność. Głównym kryterium jest zysk operacyjny, lecz przy zachowaniu żywotności, np. wymiana akumulatorów co pięć lat. Współczynnik wykorzystania pojemności wyraża intensywność pracy magazynu. Ponadto wraz ze wzrostem wartości granicznej względnego zysku operacyjnego rośnie średni zysk, co jest skutkiem niezatwierdzania cykli o niższych zyskach względnych. Niezależnie od parametrów symulacji magazyny Li-ion mają największe współczynniki wykorzystania pojemności oraz zyski operacyjne. Spośród otrzymanych wyników optymalną wartością jest magazyn Li-ion, przy  $Q_u/Q_n = 90\%$  i względnym zysku granicznym równym

30 PLN/MWh. W przypadku wartości granicznej 15 PLN/MWh nie otrzymujemy znacznego przyrostu zysku. Jest to typowy problem optymalizacji wielokryterialnej w sensie Pareto. Do tego celu można użyć algorytmów ewolucyjnych z niszowaniem [1]. Po otrzymaniu frontu Pareto należy wybrać jedno rozwiązanie, wykorzystując dowolną metodę lub kryterium, np. maksymalizacji zysku operacyjnego. Kolejnym etapem prac będzie zbadanie możliwości efektywnego zastosowania algorytmów ewolucyjnych do optymalizacji zysku operacyjnego i żywotności za pomocą zysku względnego granicznego,  $Q_u/Q_n$  oraz rodzaju technologii.



Względny zysk operacyjny graniczny = 70 zł/MWh, Qn = 10 MWh

| Qu/Qn % | NaS               |                     |                             |                     |                    |                              |                | Li-ion            |                     |                             |                     |                    |                              |                | PbAcid            |                     |                             |                     |                    |                              |                |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|----------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|----------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|----------------|
|         | Zysk op. tys. PLN | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk PLN/MWh | E <sub>max</sub> % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata | Zysk op. tys. PLN | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk PLN/MWh | E <sub>max</sub> % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata | Zysk op. tys. PLN | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk PLN/MWh | E <sub>max</sub> % | Wsp. wykorzyst. pojemności % | Żywotność lata |
| 10      | 60,7              | 0,36                | 523                         | 116,13              | 100                | 35,5                         | > 20           | 99,5              | 0,57                | 888                         | 112,10              | 100                | 57,0                         | > 20           | 32,9              | 0,18                | 255                         | 129,31              | 100                | 18,4                         | > 20           |
| 20      | 112,4             | 0,36                | 963                         | 116,78              | 100                | 32,7                         | > 20           | 199,1             | 0,57                | 1 776                       | 112,10              | 100                | 57,0                         | > 20           | 65,5              | 0,18                | 505                         | 129,57              | 100                | 18,3                         | > 20           |
| 30      | 154,4             | 0,36                | 1 314                       | 117,51              | 100                | 29,8                         | > 20           | 298,6             | 0,57                | 2 664                       | 112,10              | 100                | 57,0                         | > 20           | 97,0              | 0,18                | 745                         | 130,15              | 100                | 18,0                         | > 20           |
| 40      | 182,7             | 0,36                | 1 561                       | 117,10              | 100                | 26,5                         | > 20           | 398,1             | 0,57                | 3 552                       | 112,10              | 100                | 57,0                         | > 20           | 127,4             | 0,18                | 976                         | 130,59              | 100                | 17,6                         | > 20           |
| 50      | 204,1             | 0,36                | 1 747                       | 116,79              | 100                | 23,7                         | > 20           | 497,7             | 0,57                | 4 440                       | 112,10              | 100                | 57,0                         | > 20           | 154,4             | 0,18                | 1 179                       | 131,00              | 100                | 17,0                         | > 20           |
| 60      | 217,7             | 0,36                | 1 873                       | 116,24              | 100                | 21,2                         | > 20           | 597,2             | 0,57                | 5 328                       | 112,10              | 100                | 57,0                         | 19             | 175,6             | 0,18                | 1 332                       | 131,80              | 100                | 16,1                         | > 20           |
| 70      | 223,7             | 0,36                | 1 931                       | 115,82              | 100                | 18,7                         | > 20           | 696,7             | 0,57                | 6 216                       | 112,10              | 100                | 57,0                         | 14,4           | 196,3             | 0,18                | 1 481                       | 132,55              | 100                | 15,3                         | > 20           |
| 80      | 227,4             | 0,36                | 1 968                       | 115,60              | 100                | 16,7                         | > 20           | 796,3             | 0,57                | 7 103                       | 112,10              | 100                | 57,0                         | 12             | 214,2             | 0,18                | 1 607                       | 133,29              | 100                | 14,5                         | > 20           |
| 90      | 229,3             | 0,36                | 1 985                       | 115,51              | 100                | 15,0                         | > 20           | 895,8             | 0,57                | 7 991                       | 112,10              | 100                | 57,0                         | 9,6            | 231,5             | 0,18                | 1 728                       | 133,97              | 100                | 13,9                         | > 20           |
| 100     | 230,3             | 0,36                | 1 994                       | 115,49              | 100                | 13,5                         | > 20           | 994,3             | 0,57                | 8 868                       | 112,11              | 100                | 57,0                         | 7,2            | 242,9             | 0,18                | 1 811                       | 134,12              | 100                | 13,1                         | > 20           |

Względny zysk operacyjny graniczny = 15 zł/MWh, Qn = 10 MWh

| Qu/Qn % | NaS               |                     |                             |                     |                    |                                    |                | Li-ion            |                     |                             |                     |                    |                                    |                | PbAcid            |                     |                             |                     |                    |                                    |                |
|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|----------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|----------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|----------------|
|         | Zysk op. tys. PLN | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk PLN/MWh | E <sub>max</sub> % | Wsp. wykorzyst. pojemności użyty % | Żywotność lata | Zysk op. tys. PLN | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk PLN/MWh | E <sub>max</sub> % | Wsp. wykorzyst. pojemności użyty % | Żywotność lata | Zysk op. tys. PLN | Względny czas pracy | Energia oddana do sieci MWh | Średni zysk PLN/MWh | E <sub>max</sub> % | Wsp. wykorzyst. pojemności użyty % | Żywotność lata |
| 10      | 102,3             | 0,97                | 1 435                       | 71,29               | 100                | 97,0                               | > 20           | 138,0             | 1                   | 1 683                       | 82,01               | 100                | 100,0                              | > 20           | 65,7              | 0,78                | 1 081                       | 60,77               | 100                | 78,1                               | > 20           |
| 20      | 197,2             | 0,97                | 2 849                       | 69,22               | 100                | 96,4                               | > 20           | 276,1             | 1                   | 3 367                       | 82,01               | 100                | 100,0                              | > 20           | 130,6             | 0,78                | 2 153                       | 60,68               | 100                | 77,8                               | > 20           |
| 30      | 284,0             | 0,97                | 4 237                       | 67,02               | 100                | 95,6                               | > 20           | 414,1             | 1                   | 5 050                       | 82,01               | 100                | 100,0                              | > 20           | 193,6             | 0,78                | 3 201                       | 60,48               | 100                | 77,1                               | > 20           |
| 40      | 354,9             | 0,97                | 5 544                       | 64,01               | 100                | 93,9                               | > 20           | 552,2             | 1                   | 6 733                       | 82,01               | 100                | 100,0                              | > 20           | 254,5             | 0,78                | 4 224                       | 60,26               | 100                | 76,3                               | 15             |
| 50      | 417,1             | 0,97                | 6 789                       | 61,44               | 100                | 92,0                               | > 20           | 690,2             | 1                   | 8 416                       | 82,01               | 100                | 100,0                              | 15,2           | 309,9             | 0,78                | 5 193                       | 59,68               | 100                | 75,1                               | 12             |
| 60      | 466,3             | 0,97                | 7 951                       | 58,65               | 100                | 89,8                               | 19,9           | 828,3             | 1                   | 10 100                      | 82,01               | 100                | 100,0                              | 10,2           | 356,4             | 0,78                | 6 059                       | 58,82               | 100                | 73,0                               | 10             |
| 70      | 500,7             | 0,97                | 8 901                       | 56,25               | 100                | 86,2                               | 15,6           | 966,3             | 1                   | 11 783                      | 82,01               | 100                | 100,0                              | 7,6            | 401,7             | 0,78                | 6 903                       | 58,19               | 100                | 71,3                               | 8,5            |
| 80      | 524,2             | 0,97                | 9 585                       | 54,69               | 100                | 81,2                               | 12,6           | 1 104,3           | 1                   | 13 466                      | 82,01               | 100                | 100,0                              | 6,3            | 439,6             | 0,78                | 7 622                       | 57,67               | 100                | 68,9                               | 7,4            |
| 90      | 532,5             | 0,97                | 9 826                       | 54,19               | 100                | 74,0                               | 10,4           | 1 242,4           | 1                   | 15 149                      | 82,01               | 100                | 100,0                              | 5              | 475,3             | 0,78                | 8 297                       | 57,29               | 100                | 66,7                               | 6,5            |
| 100     | 536,0             | 0,97                | 9 920                       | 54,03               | 100                | 67,2                               | 8,8            | 1 379,3           | 1                   | 16 815                      | 82,03               | 100                | 100,0                              | 3,8            | 499,6             | 0,78                | 8 770                       | 56,96               | 100                | 63,4                               | 5,9            |

Tab. 4. Wyniki symulacji pracy magazynu przy zmiennej pojemności użytkowej i względnym zysku operacyjnym granicznym 15 zł/MWh, 30 zł/MWh, 70 zł/MWh i 100 zł/MWh

## Bibliografia

1. Białaszewski T., Wielokryterialna optymalizacja parametryczna układów

z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych, Pomorskie Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Gdańsk 2007.

## Jarosław Korpikiewicz

mgr inż.

Instytut Energetyki Oddział Gdańsk

e-mail: j.korpikiewicz@ien.gda.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki, kierunek automatyka i robotyka (2002). Jego zawodowe zainteresowania obejmują: problematykę projektowania obiektów elektroenergetycznych, jakość energii elektrycznej, usługi systemowe i regulacyjne, problematykę pracy systemu elektroenergetycznego, automatykę elektrowni i SEE oraz zastosowanie odnawialnych źródeł energii. Ponadto zajmuje się informatyką techniczną, tj. analizą i tworzeniem systemów informatycznych z zastosowaniem w elektroenergetyce i automatyce. Doktorant w Akademii Morskiej w Gdyni, w Katedrze Automatyki Okrętowej.