

The Optimization of Cable Layout Design in Wind Farm Internal Networks

Author

Andrzej Wędzik

Keywords

optimization, renewable energy, wind farms

Abstract

In the paper the author focuses on different ways of obtaining the optimal cable layout design in wind farm internal networks. Examples of calculations and comparing results for different methods of solving the objective were presented. The possibilities of using network methods (graph optimization methods) were shown. The usefulness of using the Mixed Integer Programming (MIP) method to define the optimal cable layout design in wind farm internal networks was shown.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2014313

1. Introduction

The process of constructing a new wind farm is a long-term and multi-stage development project. The investor is repeatedly faced with problems of selecting the best and most economical solutions. The problems to resolve are many [1, 2, 3]. Starting from the wind farm's best location in the area, and ending with the electricity generation optimization. At each stage of a wind farm's construction the investor can, however, save more or less money. One of the possible reductions of the capital expenditures is to optimize the cable connections between turbines within the farm's internal MV grid. Finding an appropriate layout of the connections between a wind farm's turbines and MSP substation is a typical grid issue. Very good results are obtained in such a case by using graph optimization algorithms [4] in either a classical version or with Mixed Integer Programming, MIP [5, 6, 7]. This will result in the optimal structure of the wind farm's internal MV distribution grid. In practice this grid should provide the shortest possible connections between wind turbines and the MPS substation.

One of the problems that the designer may encounter is, for instance, a forced cabling route, typically resulting from ownership of land and technical considerations. From the mathematical description point of view these are additional constraints that should be considered in the design process [8]. Also, factors such as the number of the farm's sections, number of turbines in a single section, or terrain shape can influence the final result, and should also be included in the description and solution of the problem of optimal selection of the wind farm's internal MV grid connections.

In this paper the author focuses on the problem of determining the optimal layout of cabling connections between a wind farm's turbines and MPS substation. It shows the possibilities of using the grid methods based on graph optimization, and Mixed

Integer Programming (MIP) to solve this problem. This paper attempts to answer the question: what routes should be selected for turbines connecting cabling to minimise the related capital expenditures? Also presented are practical conclusions as to the design of a wind farm's internal MV distribution grid, resulting from the completed calculations and analyses.

2. Grid methods (graph optimization)

The problem of cabling layout optimization within a wind farm's area is a typical grid problem, based on the graph formed by turbine location points. With the nodes so pre-selected, the layout of connections between these points that meets certain assumptions (constraints) should be determined. The main constraints include, but are not limited to, such factors as:

- terrain shape
- feasibility of specific cable routes
- number of sections
- number of turbines in a single section
- feasibility of specific cable amounts and sizes.

To solve these kinds of problems, the graph theory based grid algorithms is very well suited. These are well known and usually very fast algorithms for determining the optimal grid structure, subject to specific assumptions. To solve the present problem the following grid (graph optimization) algorithms [4, 9] are best suited:

- minimum spanning tree
- shortest path problem
- constrained minimum spanning tree.

The degree and extent of the different grid algorithms' usability depends primarily on the wind farm size, and hence, the complexity of the connections between individual turbines. An example algorithm of selecting the optimum cabling layout in an actual wind farm is presented below.

2.1. Determination of the set of feasible connections between individual turbines

The set of feasible connections between individual turbines is developed on the basis of details of the turbines' locations. Typically these are geographical coordinates, based on which distances between the turbines can be calculated. An example grid of connections determined for the full data set is shown in Fig. 1.

It's easily noticeable that the resulting grid of connections between the turbines is not very transparent, and the large number of possible connections may unnecessarily complicate and lengthen the optimal structure calculation. In practical solutions, already at this design stage the grid of possible connections is reduced to those that are practically feasible. An example of such a reduced grid is shown in Fig. 2.

2.2. Determination of the minimum spanning tree

The next step in determining the optimal layout of cable connections within a wind farm is to determine the minimum spanning tree on all the grid's nodes. In practice, for this purpose the farm's already reduced internal MV grid is used. Since the tree is the shortest set of connections between all functions, it may be the first approximation of the farm grid's final division into sections and individual turbines' connections. The minimum spanning tree for the present example is shown in Fig. 3.

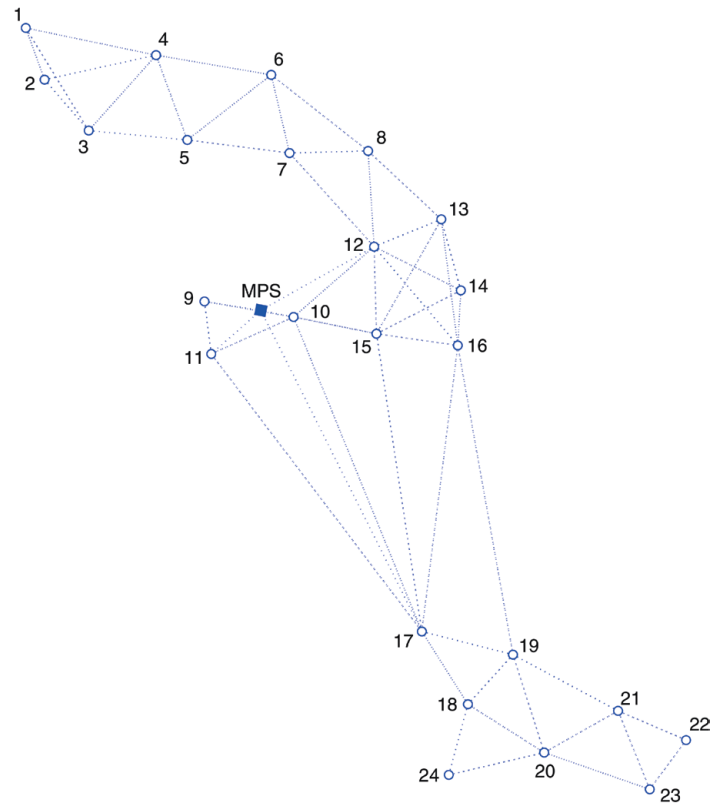


Fig. 2. Example of feasible reduced grid of possible connections between wind turbines in a wind farm

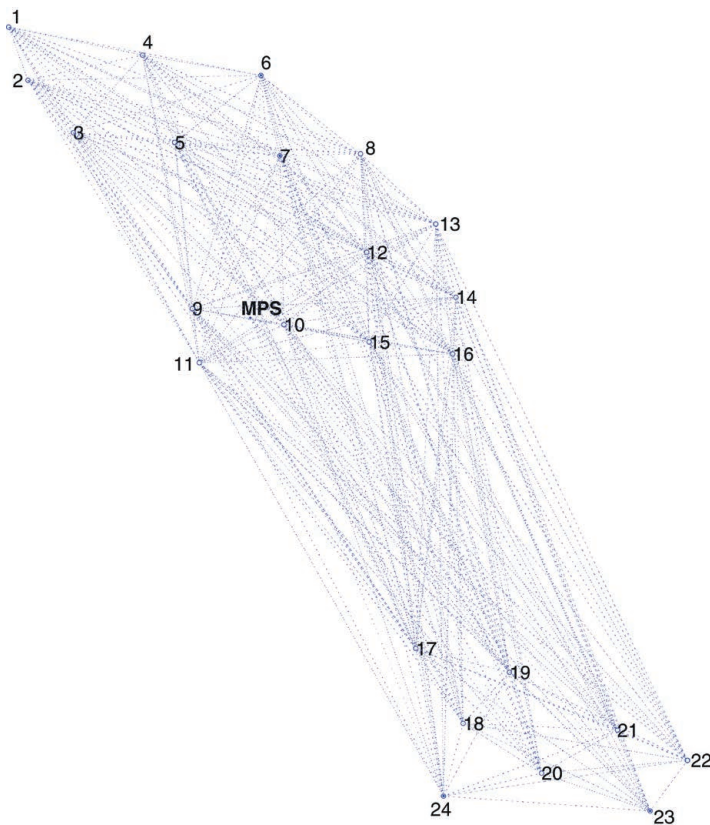


Fig. 1. Example of complete grid of possible connections between wind turbines in a wind farm

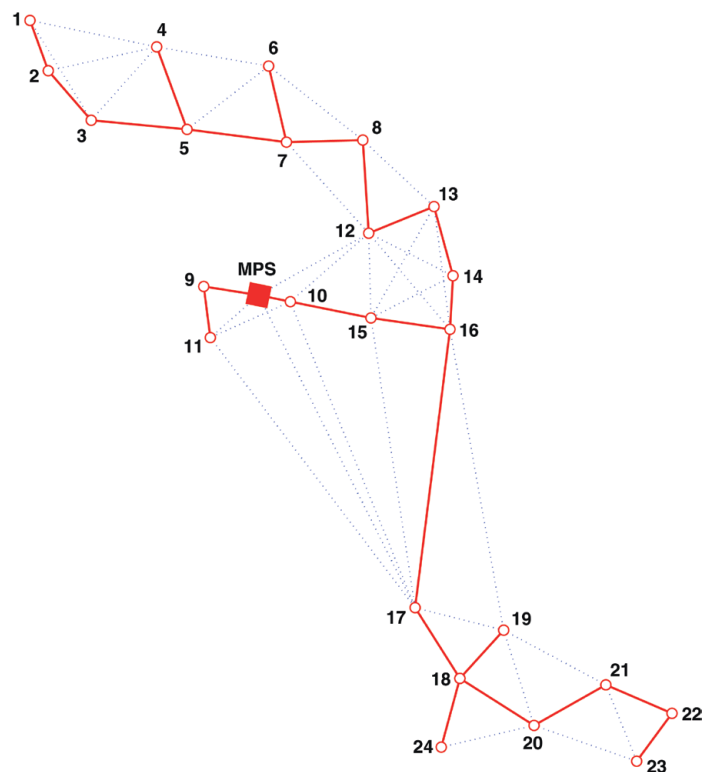


Fig. 3. Example minimum spanning tree for connections between wind turbines in a wind farm

2.3. Determination of the division into sections

It is difficult to provide clear rules for the distribution of wind farm's internal grid into sections. It depends on many factors such as:

- investor guidelines as to the number of sections
- investor guidelines as to the number of turbines in a single section
- location related constraints to the feasibility of certain cable sizes, etc.

In the present case, the investor has imposed the numbers of sections, and of turbines in a section: 3 sections, each with 8 turbines. The further process of the farm's internal MV grid optimal structure selection was subject to these assumptions. Fig. 4 shows the farm MV grid's preliminary division into sections, and the allocation of individual turbines to relevant sections. Unfortunately, at this stage the process of the farm MV grid structure's optimal selection in many cases becomes quasi-optimal because:

- allocation of turbines to individual sections is not always optimal. It can be subjective and often depends on the designer rather than the optimization criteria
- after the grid division into sections the minimum spanning tree is cut open in several locations, and the choice of the sections' connections to the MSP substation again depends on the designer, not on the optimization criteria.

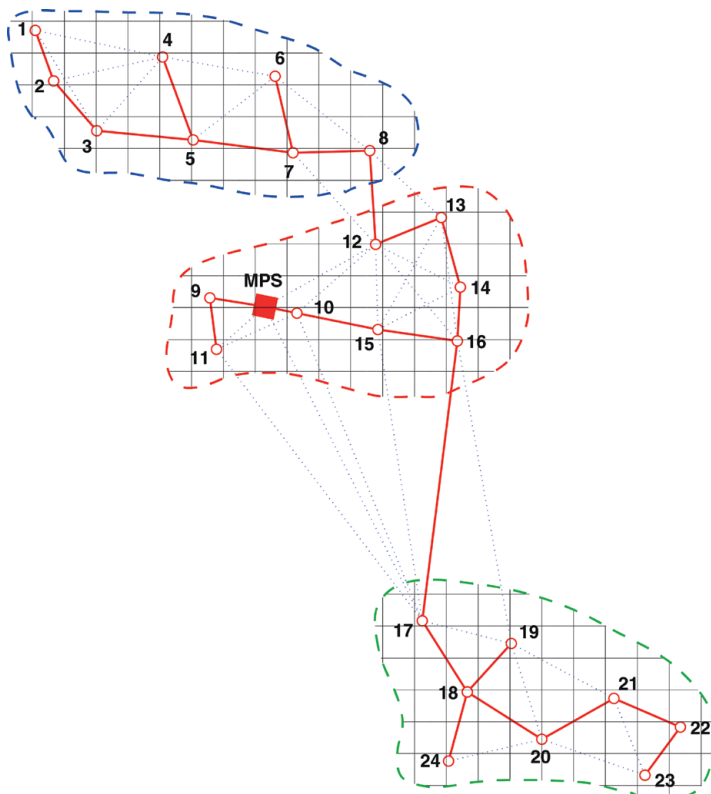


Fig. 4. Preliminary allocation of turbines to wind farm's individual sections

2.4. Determination of the final division into sections

After taking into account the above remarks, the structure of connections in individual sections (of all nodes within the section's connection structure) can be finally determined. At this design stage all additional nodes resulting from routing constraints can also be considered and included in further calculations of the optimal structure of connections. Next, using the minimal spanning tree algorithm, the final structure of the farm's internal MV grid can be sequentially determined for each of the proposed sections. In some cases the shortest path problem algorithm, e.g., to determine the shortest connection in branches and branch arms of each section, may also be quite effective. The final grid structure in the present example is shown in Fig. 5.

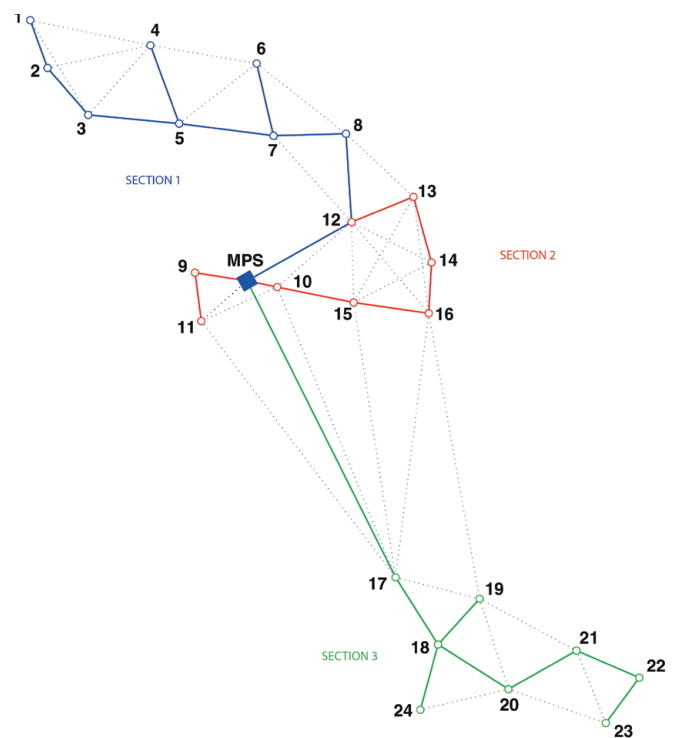


Fig. 5. The final structure of wind farm's internal MV grid obtained by grid method

2.5. Summary of grid methods

The grid algorithm described above produced the following cable lengths in the wind farm's internal MV grid:

Section	Cable length
	[m]
1	5,633
2	4,005
3	6,590
Farm total	16,228

Tab. 1. Cable lengths in the wind farm's internal MV grid produced by the grid algorithm

The presented calculation method has many advantages. The major ones include:

- simplicity and transparency of the methods (algorithms)
- speed of the calculation procedures
- applicability of commonly available standard calculation procedures.

Unfortunately, it also has some drawbacks that hinder its use. The major ones include:

- need for manual preparation of data, practically at every stage of the algorithm
- quasi-optimality of some solutions resulting from the subjective choice of connections structure dependent on the designer at certain stages of the algorithm
- poor integration with further optimization process of the selection of cables connecting turbines in the farm's internal MV grid [3].

In many cases the results obtained from grid methods are satisfactory and can be successfully applied to optimize the cable connection within a wind farm site. This refers primarily to not very extensive grids with relatively simple structures.

3. Mixed Integer Programming (MIP)

In many cases grid problems can be described and resolved not only by classical grid algorithms, but also Mixed Integer Programming, MIP [9]. The main advantages of such solutions are:

- unified mathematical description of the problem
- option to edit the grid problem specific constraints, and of integration with other MIP-enabled algorithms to solve grid problems.

For the purposes of this paper, one of the main MIP applicability factors was the ability to integrate calculations with the further optimization process of selecting cables connecting turbines in the farm's internal MV grid [3]. This chapter presents the results of calculations and their comparison with calculations for the earlier considered example of wind turbines' deployment.

3.1. Mathematical description of the problem

There are many methods and ways to describe grid problems using Mixed Integer Programming [6, 7, 10]. Depending on the needs, the classical grid methods are reflected in MIP mathematical formulas [9]. In many cases grid problems described by MIP equations are, unfortunately, of the NP-complete type, which can significantly complicate finding the optimal result. To solve the optimization problem of cabling layout on a wind farm site, the cable trench problem method was used, which combines the minimum spanning tree and shortest path problem algorithms. The method itself is an NP-complete problem. Its mathematical description is as follows [12]:

$$\min \gamma \sum_i \sum_j d_{i,j} x_{i,j} + \tau \sum_i \sum_j d_{i,j} y_{i,j} \tag{1}$$

for:

$$\sum_j x_{i,j} = n - 1 \tag{2}$$

$$\forall i \sum_j x_{i,j} - \sum_k x_{k,i} = - 1 \quad \text{for } i = 2, 3, \dots n \tag{3}$$

$$\sum_{i,j} y_{i,j} = n - 1 \quad \text{for } i < j \tag{4}$$

$$\forall (i, j) (n - 1)y_{i,j} - x_{i,j} - x_{j,i} \geq 0 \quad \text{for } i < j \tag{5}$$

$$x_{i,j} \geq 0 \tag{6}$$

$$y_{i,j} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for } i < j \tag{7}$$

where:

$x_{i,j}$ – number of cables from node i to node j , $y_{i,j}$ – matrix of connections between nodes i and j (1 – if the nodes are connected, 0 – if they are not connected), $d_{i,j}$ – matrix of distance between nodes, γ – unit cost of cable, τ – unit cost of cable laying.

The main advantage of this method is its adaptability, by formulation of appropriate constraints, among other things, to:

- selection of turbines' division for a specific number of sections
- selection of the number of turbines in a single section
- taking into account forced cable routing
- full integration with further optimization process of selecting cables connecting turbines in the farm's internal MV grid [3].

3.2. MIP application to the optimization of selecting the turbines connecting cables

The program of optimal selection of the cables connecting turbines in a wind farm's MV internal grid requires the individual turbine location details only. Based on this data (usually geographic coordinates) the entire grid's optimal structure is determined, taking into account the required numbers of sections and of wind turbines in a single section. The problem itself is solved by FICO® Xpress Optimization Suite v.7.4 64-bit means program. The program produced the wind farm's internal grid structure shown in Fig. 6.

The MIP algorithm produced the following cable lengths in the wind farm's internal MV grid:

Section	Cable length
	[m]
1	5,079
2	4,234
3	6,590
Farm total	15,903

Tab. 2. Cable lengths in the wind farm's internal MV grid produced by the MIP algorithm

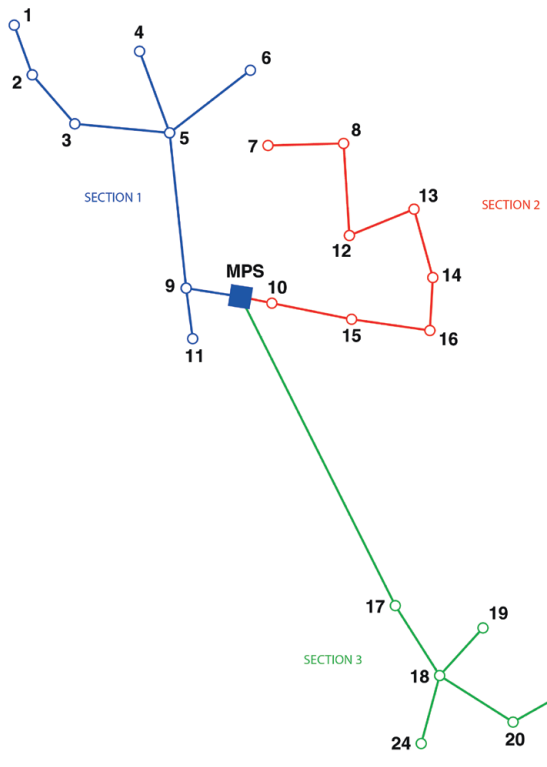


Fig. 6. The final structure of a wind farm's internal MV grid obtained by the MIP method

3.3. Summary of the Mixed Integer Programming (MIP) method

The Mixed Integer Programming (MIP) method in one computation cycle determines the optimal structure of cables connecting turbines in the wind farm's internal MV grid. The total calculation time is much shorter than in the grid methods (with regard to the whole grid connections optimization process), and ranges from a few to several tens of seconds, depending on the number of nodes and the grid structure complexity (number of sections, number of turbines in a section, etc.). The results obtained by this method are better (shorter total length of cable connections), and the procedure of the optimal cabling structure selection itself was freed of subjective choices depending on the designer, and is based on optimization criteria. The application of the modified cable trench problem method enabled full integration of the computational procedure with the further optimization process of the selection of cables connecting turbines in the farm's internal MV grid.

4. Final conclusions

The paper presents two methods to solve the optimization problem of cabling layout in a wind farm's internal MV grid. It has been shown that for solving the problem the grid methods (graph optimization) can be used, as well as the Mixed Integer Programming (MIP) methods. The calculations results are compared in Tab. 3.

From the practical point of view the difference between the results is negligible. The choice of a particular method can, however, be governed by the following factors:

Section	Cable length		Differences	
	Grid method	MIP method	[m]	[%]
1	5,633	5,079	554	10.91%
2	4,005	4,234	-229	-5.41%
3	6,590	6,590	0	0%
Farm	16,228	15,903	325	2.04%

Tab. 3. Cable lengths in the wind farm's internal MV grid produced by the grid and MIP algorithms

Grid method

- simplicity and transparency of the methods (algorithms)
- speed of the calculation procedures
- applicability of commonly available standard calculation procedures.

Mixed Integer Programming (MIP)

- unified mathematical description of the problem
- option to edit the grid problem specific constraints
- option to integrate with other MIP-enabled algorithms to solve grid problems.

Some very important advantages of the MIP method are the options to:

- select turbines' division for a specific number of sections
- select the number of turbines in a single section
- take into account forced cable routing
- fully integrate with further optimization process of the selection of cables connecting turbines in the farm's internal MV grid [3].

Due to the above arguments the MIP Mixed Integer Programming method seems to be more useful and have more computational capabilities than the grid methods. This does not mean, however, that the graph optimization based methods are no longer useful. It must be remembered that grid problems described by MIP equations are NP-complete, which in the case of large-size structures can considerably complicate and prolong finding the optimal solution.

REFERENCES

1. Lundberg S., Evaluation of wind farm layouts, *EPE Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 14–21, February 2006.
2. Lundberg S., Thesis For The Degree Of Doctor Of Philosophy – “Wind Farm Configuration and Energy Efficiency Studies – Series DC versus AC Layouts”, Department of Energy and Environment, Chalmers University Of Technology, Goteborg, Sweden 2006.
3. Wędzik A., Optymalizacja doboru kabli, łączących turbiny na obszarze farmy wiatrowej [Optimizing the selection of cables connecting turbines in wind farm], XV The XV. Jubilee International Scientific Conference “Current Problems in Power Engineering. APE'11”, Jurata 8–10 June 2011, Vol. IV, pp. 77–87.
4. Bertsekas D.P., *Network Optimization: Continuous and Discrete Models*; Athena Scientific, Belmont, MIT Massachusetts, 1998.
5. Donovan S., Wind Farm Optimization, Proceedings of the 7th

- Triennial Conference of the Asia-Pacific Operations Research Society, Manila, 2006.
6. Donovan S. et. al., Mixed Integer Programming Models for Wind Farm Design, MIP 2008 Workshop on Mixed Integer Programming, Columbia University, New York City, 2008.
 7. Donovan S., An Improved Mixed Integer Programming Model for Wind Farm Layout Optimisation, 41 st Annual ORSNZ Conference, 30th November and 1 st December, 2006, New Zealand.
 8. Samorani M., The Wind Farm Layout Optimization Problem, Leeds School of Business Research Paper Series, Leeds School of Business, University of Colorado at Boulder, January 28, 2010.
 9. Wu B.Y., Chao K.-M., Spanning Trees and Optimization Problems, Chapman & Hall/CRC, 2004.
 10. Berzan C. et. al., Algorithms for Cable Network Design on Large-scale Wind Farms. Technical Report, MIT, 2011.
 11. Attias K., Ladany S.P., Optimal Layout for Wind Turbine Farms, World Renewable Energy Congress 2011 – Linköping, Sweden, 8–13 May 2011.
 12. Vasko FJ. et al., The cable trench problem: combining the shortest path and minimum spanning tree problems, *Elsevier Science, Computers & Operations Research* 2002, Vol. 29, pp. 441–458.
-

Andrzej Wędzik

Lodz University of Technology

e-mail: andrzej.wedzik@p.lodz.pl

Lodz University of Technology graduate. Since 1986 with the Institute of Electrical Power Engineering of his alma mater, now as an assistant professor. His research activities focus on issues related to renewable energy, energy law, energy market and optimization. Since 2007 he has chaired the Central Section for Renewable Energy and the Environment of Association of Polish Electrical Engineers (SEP).

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 144–149. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Optymalizacja układu połączeń kablowych na obszarze farmy wiatrowej

Autor
Andrzej Wędzik

Słowa kluczowe
optymalizacja, energetyka odnawialna, farmy wiatrowe

Streszczenie

Farmy wiatrowe stają się coraz większe i zajmują coraz rozleglejsze obszary. Sprawia to, że instalacje wewnętrzne tych farm przyjmują coraz bardziej skomplikowane postaci. Ich połączenia zaczynają przypominać rozległe struktury sieciowe, często o długości kilkudziesięciu kilometrów. Z tego powodu każdy inwestor zaraz po wyborze lokalizacji staje przed dylematem określenia sposobu połączenia turbin wchodzących w skład farmy wiatrowej. Rodzi się wówczas naturalne pytanie: jak zaprojektować i skonfigurować sieć połączeń wewnętrznych farmy wiatrowej, aby koszty takiego przedsięwzięcia były najniższe? Efektem tego etapu działań powinna być optymalna struktura wewnętrznej sieci rozdzielczej SN farmy wiatrowej. W praktyce sieć ta powinna zapewniać najkrótsze możliwe połączenia pomiędzy turbinami wiatrowymi oraz głównym punktem zasilającym (GPZ) farmy wiatrowej. W artykule autor przedstawia różne sposoby realizacji wytyczonego w tytule celu. Przytoczone zostały przykłady obliczeń i porównania wyników dla różnych metod rozwiązania postawionego zadania. Wykazano przydatność zastosowania metody optymalizacji całkowitoliczbowej (ang. *Mixed Integer Programming*, MIP) do określania optymalnego układu połączeń kablowych na terenie farmy wiatrowej.

1. Wprowadzenie

Proces inwestycyjny związany z budową nowej farmy wiatrowej jest przedsięwzięciem długotrwałym i wieloetapowym. Inwestor wielokrotnie staje przed problemami wyboru najlepszych i najbardziej ekonomicznych rozwiązań. Problemów do rozstrzygnięcia jest wiele [1, 2, 3]. Począwszy od najlepszej lokalizacji farmy wiatrowej w terenie, a skończywszy na optymalizacji produkcji energii elektrycznej. Na każdym z etapów budowy farmy wiatrowej inwestor może jednak zaoszczędzić mniejsze lub większe pieniądze.

Jedną z możliwości obniżenia kosztów inwestycyjnych jest optymalizacja układu połączeń kablowych pomiędzy turbinami, w wewnętrznej sieci SN farmy wiatrowej. Szukanie odpowiedniego układu połączeń pomiędzy turbinami oraz stacją GPZ farmy wiatrowej jest typowym zagadnieniem sieciowym. Bardzo dobre efekty uzyskuje się, stosując w takim przypadku algorytmy optymalizacji grafów [4] zarówno w wersji klasycznej, jak i z wykorzystaniem np. programowania całkowitoliczbowego, ze zmiennymi binarnymi (ang. *Mixed Integer Programming*, MIP) [5, 6, 7]. Efektem tego typu działań jest optymalna struktura połączeń wewnętrznej sieci rozdzielczej SN farmy wiatrowej. W praktyce sieć ta zapewnia najkrótsze możliwe połączenia pomiędzy turbinami wiatrowymi oraz GPZ. Jednym z problemów, na które może natrafić projektant, jest np. wymuszona trasa prowadzenia kabli, wynikająca najczęściej z praw własności gruntów oraz względów technicznych. Z punktu widzenia opisu matematycznego są to dodatkowe ograniczenia, które należy uwzględnić w procesie projektowania [8]. Również takie czynniki, jak: liczba sekcji farmy, liczba turbin w pojedynczej sekcji czy też ukształtowanie terenu mogą wpłynąć na wynik końcowy i powinny być również uwzględnione w opisie oraz rozwiązaniu problemu optymalnego doboru układu połączeń sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej.

W prezentowanym artykule autor koncentruje się na problemie określenia optymalnego układu połączeń kabli łączących turbiny i GPZ farmy wiatrowej. Pokazuje możliwości wykorzystania metod sieciowych, opartych na optymalizacji grafu, oraz programowania całkowitoliczbowego, z zastosowaniem zmiennych binarnych (MP) do rozwiązania takiego problemu. Artykuł jest próbą odpowiedzi na pytanie: jakimi trasami poprowadzić kable łączące turbiny, aby koszty takiej inwestycji były najniższe? Przedstawiono również praktyczne wnioski co do projektowania wewnętrznej sieci rozdzielczej SN farmy wiatrowej, wynikające z przeprowadzonych obliczeń i analiz.

2. Metody sieciowe (optymalizacja grafu)

Problem optymalizacji układu połączeń kablowych na obszarze farmy wiatrowej jest typowym problemem sieciowym, opartym na grafie utworzonym z punktów usytuowania turbin. Przy zadanych punktach węzłowych należy określić układ połączeń pomiędzy tymi punktami, spełniających określone założenia (ograniczenia). Do podstawowych warunków ograniczających należą takie czynniki, jak m.in.:

- ukształtowanie terenu
- możliwości prowadzenia kabli konkretnymi trasami
- liczba sekcji
- liczba turbin w pojedynczej sekcji
- możliwość stosowania określonej ilości i przekrojów kabli.

Do rozwiązania tego rodzaju problemów bardzo dobrze nadają się algorytmy sieciowe, oparte na teorii grafów. To dobrze znane i najczęściej bardzo szybko działające algorytmy, służące do określania optymalnej struktury sieci przy konkretnych założeniach. Do rozwiązania postawionego w temacie problemu najbardziej predysponowane są następujące algorytmy sieciowe (optymalizacji grafu) [4, 9]:

- algorytm minimalnego drzewa rozpinającego (ang. *minimum spanning tree*)

- algorytm wyboru najkrótszej ścieżki (ang. *shortest path problem*)
- algorytmy z rodziny ograniczonego minimalnego drzewa rozpinającego (ang. *constrained minimum spanning tree*).

Stopień i zakres wykorzystania poszczególnych algorytmów sieciowych zależy przede wszystkim od wielkości farmy wiatrowej, a co za tym idzie, stopnia skomplikowania układów połączeń pomiędzy pojedynczymi turbinami. Poniżej przedstawiony został przykładowy algorytm postępowania przy wyborze optymalnego układu połączeń kablowych na terenie rzeczywistej farmy wiatrowej.

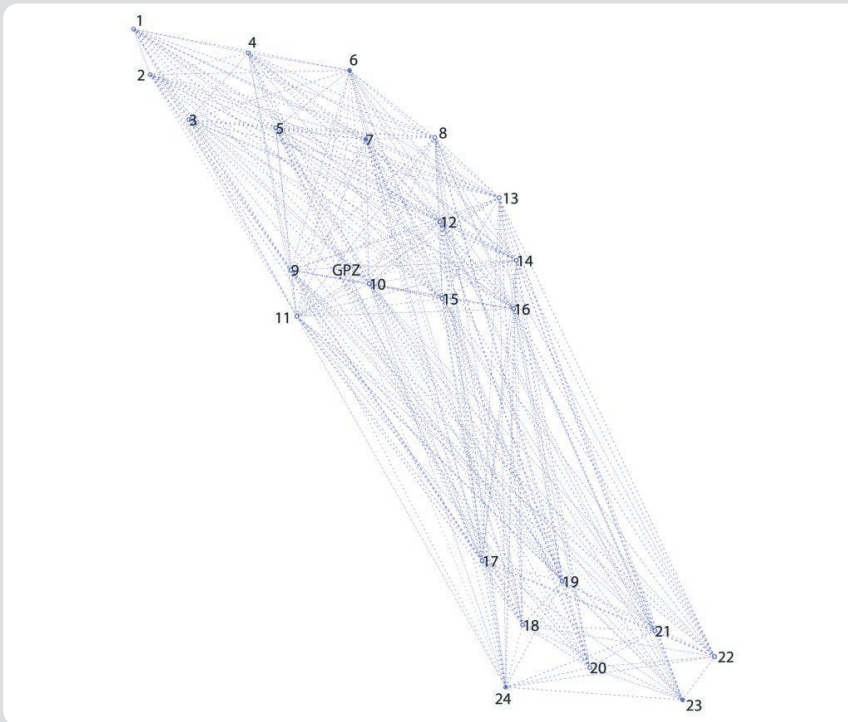
2.1. Określenie zestawu możliwych połączeń pomiędzy pojedynczymi turbinami

Zestaw możliwych połączeń pomiędzy pojedynczymi turbinami tworzony jest na podstawie informacji o usytuowaniu tych turbin. Najczęściej są to współrzędne geograficzne, na podstawie których można wyliczyć np. odległości pomiędzy kolejnymi turbinami. Przykład sieci połączeń, określony dla pełnego zestawu danych, przedstawiony został na rys. 1.

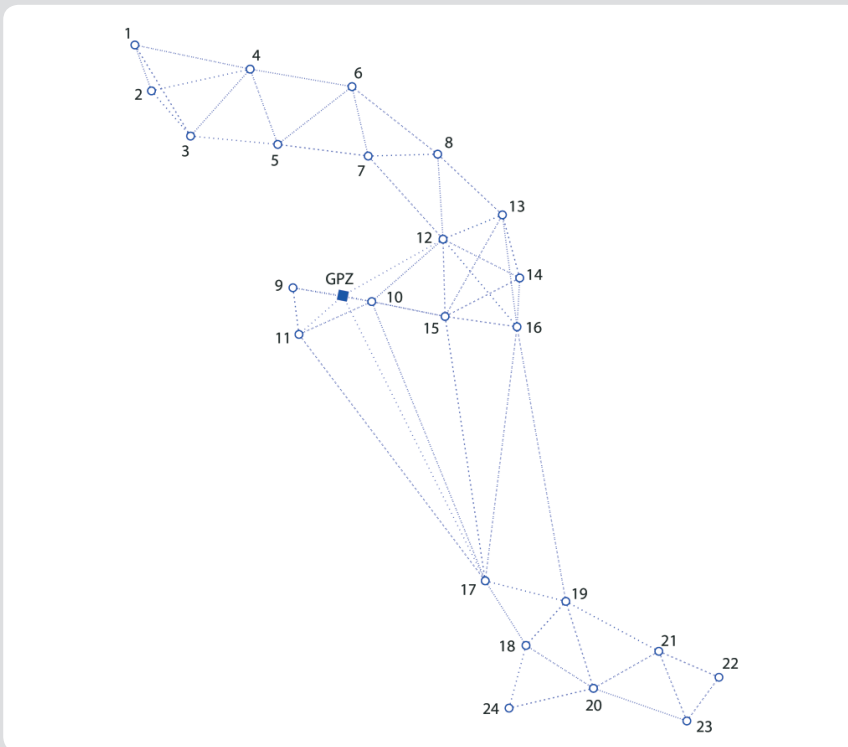
Łatwo zauważyć, że otrzymana sieć połączeń pomiędzy turbinami jest mało przejrzysta, a duża liczba możliwych połączeń może niepotrzebnie skomplikować i wydłużyć obliczenia optymalnej struktury. W praktycznych rozwiązaniach, już na tym etapie projektowania, ogranicza się sieć możliwych połączeń do tych, które są realne z praktycznego punktu widzenia. Przykład takiej sieci zredukowanej został zamieszczony na rys. 2.

2.2. Określenie minimalnego drzewa rozpinającego (*minimum spanning tree*)

Kolejnym etapem na drodze do wyznaczenia optymalnego układu połączeń kablowych na terenie farmy wiatrowej jest określenie minimalnego drzewa rozpinającego (ang. *minimum spanning tree*) na wszystkich węzłach sieci. W praktyce do tego celu



Rys. 1. Przykład pełnego układu możliwych połączeń pomiędzy turbinami wiatrowymi na terenie farmy wiatrowej



Rys. 2. Przykład realnego, zredukowanego układu możliwych połączeń pomiędzy turbinami wiatrowymi na terenie farmy wiatrowej

używa się już zredukowanego układu połączeń wewnętrznej sieci SN farmy wiatrowej. Ponieważ drzewo jest najkrótszym zestawem połączeń łączącym wszystkie funkcje, dlatego też może być ono pierwszym przybliżeniem ostatecznego podziału sieci farmy wiatrowej na sekcje i połączenia poszczególnych turbin. Minimalne drzewo rozpinające,

dla prezentowanego przykładu, zamieszczone zostało na rys. 3.

2.3. Określenie podziału na sekcje

Trudno jest podać jednoznaczne zasady podziału sieci wewnętrznej farmy wiatrowej na sekcje. Jest on uzależniony od wielu czynników, takich jak m.in.:

- wytyczne inwestora co do liczby sekcji
- wytyczne inwestora co do liczby turbin w pojedynczej sekcji
- uwarunkowania terenowe
- możliwości stosowania określonych przekrojów kabli itp.

W prezentowanym przypadku inwestor narzucił liczbę sekcji i turbin w sekcji: 3 sekcje po 8 turbin w każdej. Dla takiego właśnie układu przeprowadzono dalszy proces optymalnego doboru struktury połączeń wewnętrznej sieci SN farmy wiatrowej. Na rys. 4 został zaprezentowany wstępny podział sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej i przydział poszczególnych turbin do odpowiednich sekcji. Niestety, na tym etapie proces optymalnego doboru struktury połączeń wewnętrznej sieci SN farmy wiatrowej w wielu przypadkach staje się procesem *quasi*-optymalnym, gdyż:

- przydział turbin do poszczególnych sekcji nie zawsze jest optymalny; może on być subiektywny i często zależy od projektanta, a nie od kryteriów optymalizacyjnych
- po podziale na sekcje minimalne drzewo rozpinające ulega rozcięciu w kilku miejscach, a wybór połączeń sekcji z GPZ ponownie zależy od projektanta, a nie od kryteriów optymalizacyjnych.

2.4. Określenie ostatecznej struktury podziału na sekcje

Po uwzględnieniu powyższych uwag można dokonać ostatecznego wyboru struktury połączeń w poszczególnych sekcjach (wszystkich węzłów wchodzących w strukturę połączeń danej sekcji). Na tym etapie projektowania można również uwzględnić wszystkie węzły dodatkowe, wynikające z ograniczeń dotyczących wytyczanej trasy, i włączyć je do dalszych obliczeń optymalnej struktury połączeń. Następnie, wykorzystując algorytm minimalnego drzewa rozpinającego (ang. *minimum spanning tree*), kolejno do każdej z zaproponowanych sekcji można określić ostateczną strukturę sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej. W niektórych przypadkach dobre efekty daje również wykorzystanie algorytmu wyboru najkrótszej ścieżki (ang. *shortest path problem*), np. w celu określenia najkrótszych połączeń w gałęziach i odnogach gałęzi poszczególnych sekcji. W rozważanym przykładzie ostateczna struktura sieci przedstawiona została na rys. 5.

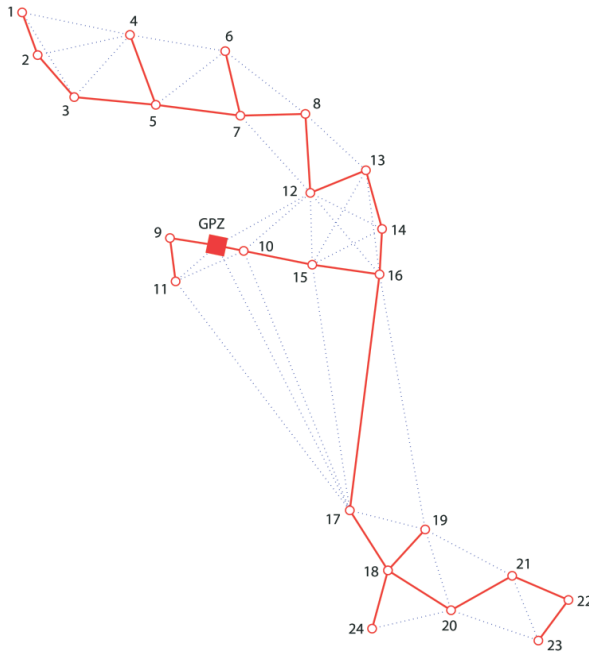
2.5. Podsumowanie metod sieciowych

Wykorzystanie przedstawionego powyżej algorytmu sieciowego pozwoliło uzyskać następujące długości kabli w wewnętrznej sieci SN farmy wiatrowej:

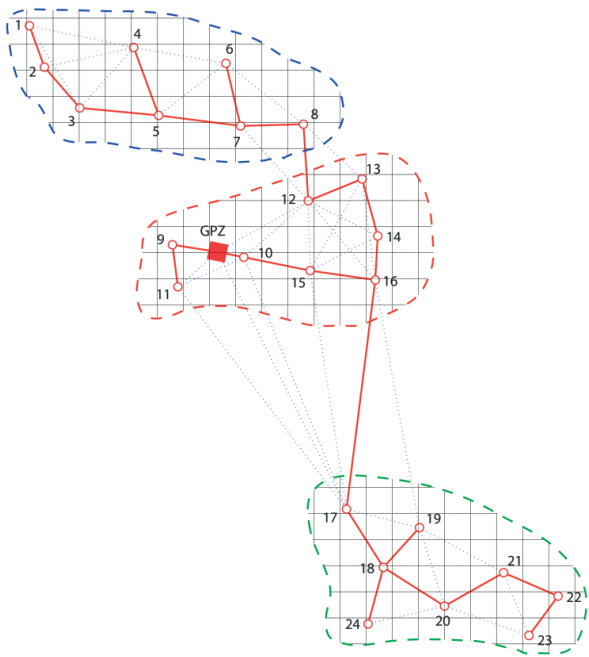
Zastosowanie przedstawionej metody obliczeniowej ma wiele zalet. Do najważniejszych należą:

Sekcja	Długość kabli
	[m]
1	5 633
2	4 005
3	6 590
Razem farma	16 228

Tab. 1. Zestawienie danych długości kabli dla sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej, algorytm sieciowy



Rys. 3. Minimalne drzewo rozpinające dla układu połączeń pomiędzy turbinami wiatrowymi na terenie farmy wiatrowej



Rys. 4. Wstępny przydział turbin do poszczególnych sekcji farmy wiatrowej

- prostota i przejrzystość stosowanych metod (algorytmów)
 - szybkość działania procedur obliczeniowych
 - możliwość wykorzystania ogólnie dostępnych, standardowych procedur obliczeniowych.
- Niestety, posiada ona również kilka wad utrudniających jej stosowanie. Do najważniejszych należą:
- konieczność ręcznego przygotowywania danych, praktycznie na każdym etapie działania algorytmu

- *quasi*-optymalność niektórych rozwiązań, wynikająca z subiektywnego i zależnego od projektanta wyboru struktury połączeń, na niektórych etapach działania algorytmu
 - słaba integracja z dalszym procesem optymalizacji doboru kabli łączących turbiny w sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej [3].
- W wielu przypadkach wyniki uzyskane z wykorzystaniem metod sieciowych dają zadowalające rezultaty i mogą być z powodzeniem stosowane do optymalizacji układu

połączeń kablowych na obszarze farmy wiatrowej. Dotyczy to przede wszystkim sieci niezbyt rozległych i o stosunkowo prostej strukturze.

3. Metody programowania całkowitoliczbowego (MIP)

Problemy sieciowe, obok stosowania i wykorzystania klasycznych algorytmów sieciowych, mogą być w wielu przypadkach opisane i rozwiązane z wykorzystaniem metod programowania całkowitoliczbowego, z udziałem zmiennych binarnych (ang. *Mixed Integer Programming*, MIP) [9]. Głównymi zaletami takich rozwiązań są:

- jednolity, matematyczny opis problemu
- możliwość redagowania ograniczeń wynikających ze specyfiki opisywanego problemu sieciowego
- możliwość integracji z innymi algorytmami wykorzystującymi MIP do rozwiązywania problemów sieciowych.

Na potrzeby niniejszego artykułu jednym z głównych czynników zastosowania techniki MIP była możliwość integracji obliczeń z dalszym procesem optymalizacji doboru kabli łączących turbiny w sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej [3]. W rozdziale tym zaprezentowano wyniki obliczeń oraz ich porównanie z obliczeniami dla rozważanego wcześniej przykładu układu rozmieszczenia turbin wiatrowych.

3.1. Opis matematyczny problemu

Istnieje wiele metod i sposobów opisu problemu sieciowego za pomocą programowania całkowitoliczbowego [6, 7, 10]. W zależności od potrzeb klasyczne metody sieciowe znalazły swoje odzwierciedlenie w matematycznych formułach MIP [9]. W wielu przypadkach problemy sieciowe, opisane równaniami programowania całkowitoliczbowego, są niestety problemami typu NP-zupełnego (*NP-complete*), co może znacznie skomplikować znalezienie optymalnego wyniku. Na potrzeby rozwiązania problemu optymalizacji układu połączeń kablowych na obszarze farmy wiatrowej wykorzystana została metoda *The cable trench problem*, która jest połączeniem algorytmu minimalnego drzewa rozpinającego oraz algorytmu wyboru najkrótszej ścieżki. Sama metoda jest problemem NP-zupełnym. Jej opis matematyczny ma następującą postać [12]:

$$\min \gamma \sum_i \sum_j d_{i,j} x_{i,j} + \tau \sum_i \sum_j d_{i,j} y_{i,j} \quad (1)$$

dla:

$$\sum_j x_{i,j} = n - 1 \quad (2)$$

$$\forall i \sum_j x_{i,j} - \sum_k x_{k,i} = -1 \quad \text{dla } i = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i,j} y_{i,j} = n - 1 \quad \text{dla } i < j \quad (4)$$

$$\forall (i,j) (n-1)y_{i,j} - x_{i,j} - x_{j,i} \geq 0 \quad \text{dla } i < j \quad (5)$$

$$x_{i,j} \geq 0 \quad (6)$$

$$y_{i,j} = 0 \text{ lub } 1 \quad \text{dla } i < j \quad (7)$$

gdzie: x_{ij} – liczba kabli od węzła i do węzła j , y_{ij} – macierz połączeń pomiędzy węzłami i oraz j (1 – jeżeli węzły są połączone, 0 – w przeciwnym wypadku), d_{ij} – macierz odległości pomiędzy węzłami, γ – jednostkowy koszt kabla, τ – jednostkowy koszt ułożenia kabla.

Główną zaletą wykorzystania tej metody jest możliwość adaptowania jej, poprzez sformułowanie odpowiednich ograniczeń, między innymi do:

- wyboru podziału turbin na określoną liczbę sekcji
- możliwości wyboru liczby turbin w pojedynczej sekcji
- możliwości uwzględnienia wymuszonej drogi prowadzenia kabli
- pełnej integracji z dalszym procesem optymalizacji doboru kabli łączących turbiny w sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej [3].

3.2. Wykorzystanie MIP do optymalizacji doboru kabli łączących turbiny

Program optymalnego doboru kabli łączących turbiny w sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej wymaga jedynie danych o usytuowaniu pojedynczych turbin. Na podstawie tych danych (najczęściej współrzędnych geograficznych) określana jest optymalna struktura całej sieci, uwzględniająca wymaganą liczbę sekcji oraz narzuconą liczbę turbin wiatrowych w pojedynczej sekcji. Sam problem rozwiązywany jest za pomocą programu FICO® Xpress Optimization Suite v.7.4 64-bit.

Wynikiem działania programu jest struktura sieci wewnętrznej farmy wiatrowej, przedstawiona na rys. 6.

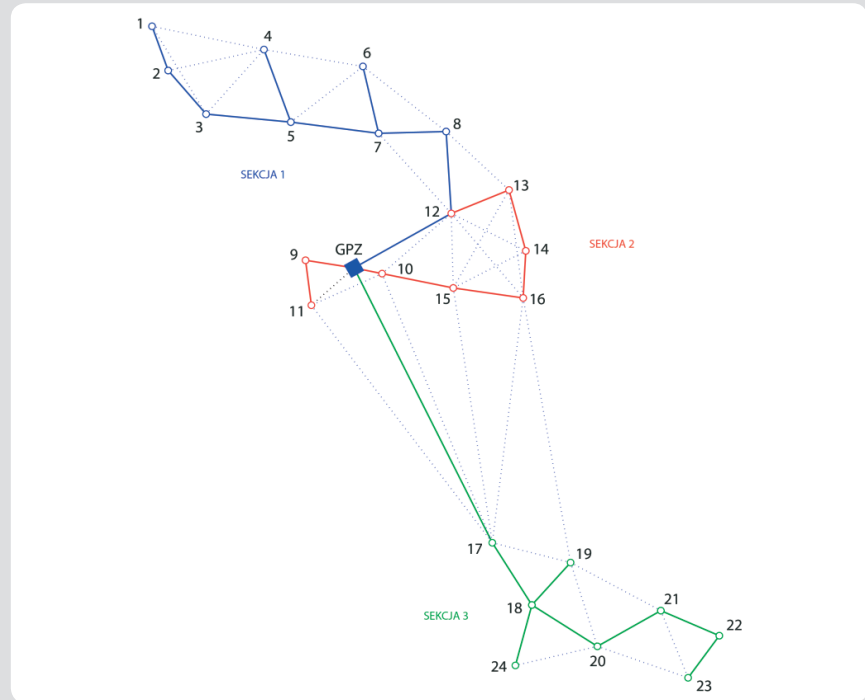
Wykorzystanie algorytmu programowania całkowitoliczbowego pozwoliło uzyskać następujące długości kabli w wewnętrznej sieci SN farmy wiatrowej:

Sekcja	Długość kabli	
	[m]	
1	5 079	
2	4 234	
3	6 590	
Razem farma	15 903	

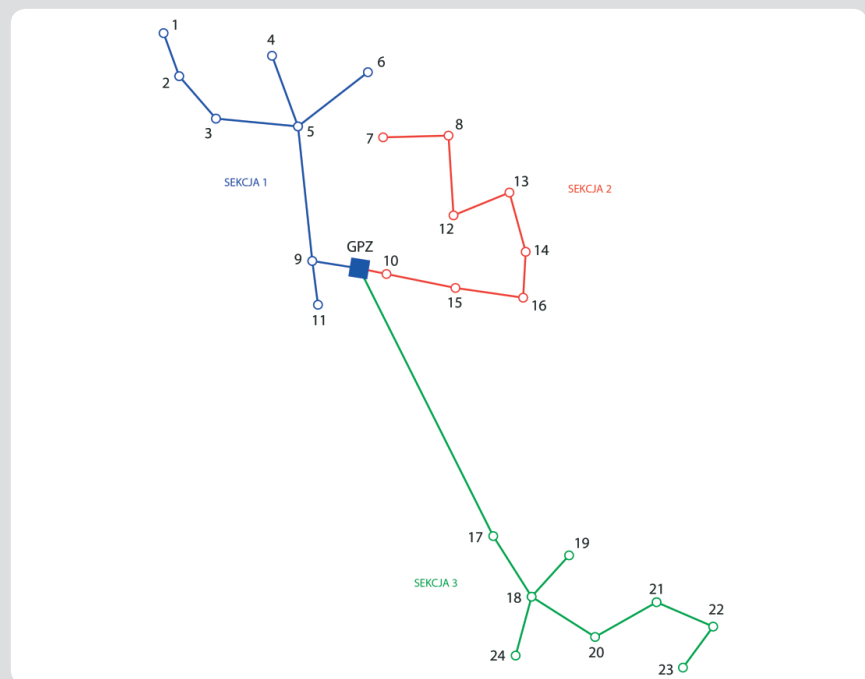
Tab. 2. Zestawienie danych długości kabli dla sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej, algorytm MIP

3.3. Podsumowanie metody programowania całkowitoliczbowego MIP

Wykorzystanie metody programowania całkowitoliczbowego MIP pozwala w jednym cyklu obliczeniowym określić optymalną strukturę połączeń kabli łączących turbiny w sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej. Całkowity czas obliczeń jest znacznie krótszy niż w metodach sieciowych (biorąc pod uwagę cały proces optymalizacji układu połączeń w sieci) i waha się w granicach od kilku do kilkudziesięciu sekund, w zależności od liczby węzłów i stopnia złożoności struktury sieci (liczby sekcji, liczby turbin w sekcji itp.). Wyniki otrzymane dzięki tej metodzie są



Rys. 5. Ostateczna struktura sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej, przy wykorzystaniu metod sieciowych



Rys. 6. Struktura sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej przy wykorzystaniu metod programowania całkowitoliczbowego

lepsze (mniejsza łączna długość połączeń kablowych), a sama procedura optymalnego doboru struktury połączeń kablowych pozabawiona została subiektywnych wyborów, zależnych od projektanta, i oparta została na kryteriach optymalizacji. Dzięki wykorzystaniu zmodyfikowanej metody *The cable trench problem* możliwa jest pełna integracja procedury obliczeniowej z dalszym procesem optymalizacji doboru kabli łączących turbiny w sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej.

4. Wnioski końcowe

W artykule przedstawione zostały dwie metody rozwiązania problemu optymalnego doboru połączeń kablowych w wewnętrznej sieci SN farmy wiatrowej. Wykazano, że do rozwiązania postawionego problemu można wykorzystać zarówno metody sieciowe (optymalizacja grafów), jak i metody programowania całkowitoliczbowego, ze zmiennymi binarnymi (MIP). Porównanie otrzymanych wyników obliczeń zestawione zostało w tab. 3.

Sekcja	Długość kabli		Różnice	
	Metoda sieciowa	Metoda MIP		
	[m]	[m]	[m]	[%]
1	5 633	5 079	554	10,91%
2	4 005	4 234	-229	-5,41%
3	6 590	6 590	0	0%
Farma	16 228	15 903	325	2,04%

Tab. 3. Zestawienie danych długości kabli dla sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej, uzyskanych w algorytmie sieciowym i algorytmie MIP

Z praktycznego punktu widzenia różnica pomiędzy otrzymanymi wynikami jest pomijalna. Za wyborem konkretnej metody mogą natomiast przemawiać następujące czynniki:

Metoda sieciowa

- prostota i przejrzystość stosowanych metod (algorytmów)
- szybkość działania procedur obliczeniowych
- możliwość wykorzystania ogólnie dostępnych, standardowych procedur obliczeniowych.

Metoda programowania całkowitoliczbowego MIP

- jednolity, matematyczny opis problemu
- możliwość redagowania ograniczeń wynikających ze specyfiki opisywanego problemu sieciowego
- możliwość integracji z innymi algorytmami, wykorzystującymi MIP do rozwiązywania problemów sieciowych.

W przypadku metody programowania całkowitoliczbowego MIP bardzo istotnym atutem jest możliwość:

- wyboru podziału turbin na określoną liczbę sekcji
- wyboru liczby turbin w pojedynczej sekcji
- uwzględnienia wymuszonej drogi prowadzenia kabli
- pełnej integracji z dalszym procesem optymalizacji doboru kabli łączących turbiny w sieci wewnętrznej SN farmy wiatrowej [3].

Powyższe argumenty sprawiają, że metoda programowania całkowitoliczbowego MIP wydaje się bardziej przydatna i dysponująca większym potencjałem możliwości obliczeniowej niż metody sieciowe. Nie oznacza to jednak, że metody oparte na optymalizacji grafów są już nieprzydatne. Trzeba bowiem pamiętać, że problemy sieciowe, opisane równaniami programowania całkowitoliczbowego, są problemami typu NP-zupełnego (ang. *NP-complete*), co w przypadku struktur wielkowymiarowych może znacznie skomplikować i wydłużyć znalezienie optymalnego rozwiązania.

Bibliografia

1. Lundberg S., Evaluation of wind farm layouts, *EPE Journal*, Vol. 16, No. 1, s. 14–21, February 2006.
2. Lundberg S., Thesis For The Degree Of Doctor Of Philosophy – „Wind Farm Configuration and Energy Efficiency Studies – Series DC versus AC Layouts”, Department of Energy and Environment, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden 2006.
3. Wędzik A., Optymalizacja doboru kabli, łączących turbiny na obszarze farmy wiatrowej, Jubileuszowa XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce. APE '11”, Jurata 8–10 czerwca 2011, tom IV, s. 77–87.

4. Bertsekas D.P., Network Optimization: Continuous and Discrete Models; Athena Scientific, Belmont, MIT Massachusetts, 1998.
5. Donovan S., Wind Farm Optimization, Proceedings of the 7th Triennial Conference of the Asia-Pacific Operations Research Society, Manila, 2006.
6. Donovan S. i in., Mixed Integer Programming Models for Wind Farm Design, MIP 2008 Workshop on Mixed Integer Programming, Columbia University, New York City, 2008.
7. Donovan S., An Improved Mixed Integer Programming Model for Wind Farm Layout Optimisation, 41st Annual ORSNZ Conference, 30th November and 1st December, 2006, New Zealand.
8. Samorani M., The Wind Farm Layout Optimization Problem, Leeds School of Business Research Paper Series, Leeds School of Business, University of Colorado at Boulder, January 28, 2010.
9. Wu B.Y., Chao K.-M., Spanning Trees and Optimization Problems, Chapman & Hall/CRC, 2004.
10. Berzan C. i in., Algorithms for Cable Network Design on Large-scale Wind Farms, Technical Report, MIT, 2011.
11. Attias K., Ladany S.P., Optimal Layout for Wind Turbine Farms, World Renewable Energy Congress 2011 – Linköping, Sweden, 8–13 May 2011.
12. Vaskó F.J. i in., The cable trench problem: combining the shortest path and minimum spanning tree problems, *Elsevier Science, Computers & Operations Research* 2002, Vol. 29, s. 441–458.

Andrzej Wędzik

dr inż.

Politechnika Łódzka

e-mail: andrzej.wedzik@p.lodz.pl

Absolwent Politechniki Łódzkiej. Od 1986 roku pracuje w Instytucie Elektroenergetyki swojej macierzystej uczelni, obecnie na stanowisku adiunkta. Jego działalność naukowo-badawcza koncentruje się na zagadnieniach związanych z energetyką odnawialną, prawem energetycznym, rynkiem energii i optymalizacją. Od 2007 roku jest przewodniczącym Centralnej Sekcji Energetyki Odnawialnej i Ochrony Środowiska SEP.