

## ZINTEGROWANA METODA OPTIMALIZACJI UKŁADU POŁĄCZEŃ I DOBORU KABLI DLA WEWNĘTRZNEJ SIECI FARMY WIATROWEJ

Andrzej WĘDZIK

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22  
tel.: (42) 631 26 08; e-mail: andrzej.wedzik@p.lodz.pl

**Streszczenie:** Sieć wewnętrzna farmy wiatrowej przypomina rozległą strukturę sieciową. Turbiny wiatrowe, rozmieszczone są na dużych obszarach terenu, a łączące je linie kablowe osiągają długości kilkudziesięciu kilometrów. Koszty budowy takiej sieci stanowią znaczący element całej inwestycji. Należy więc, już na etapie projektowania, dążyć do takiej konfiguracji układu połączeń wewnętrznych farmy wiatrowej, aby przy jednoczesnym spełnieniu warunków technicznych koszty takiego przedsięwzięcia były najniższe. Dotychczas, zazwyczaj dokonywano tego w dwóch niezależnych procesach. Najpierw określano strukturę sieci, zapewniającą najkrótsze możliwe połączenia pomiędzy turbinami, a następnie, co tak określonej struktury, dobierano odpowiednie kable, spełniające wymagania techniczne. Jednak czy przy takim podejściu projektowym zapewniony był optymalny (najniższy) koszt inwestycji? W artykule przedstawiona została odpowiedź na tak postawione pytanie. Zaprezentowana została metoda realizacji wytyczonego w tytule celu. Przytoczone zostały przykłady obliczeń i porównania wyników dla metod optymalnego doboru struktury połączeń i przekrojów kabli sieci wewnętrznej farmy wiatrowej: dwuetapowej i zintegrowanej. Wykazano przydatność zastosowania metody nieliniowej optymalizacji całkowitoliczbowej (*Mixed Integer Non-linear Programming* – MINLP), do określania optymalnej struktury sieci kablowych, na terenie farmy wiatrowej.

**Słowa kluczowe:** Optymalizacja, energetyka odnawialna, farmy wiatrowe.

### 1. WPROWADZENIE

Projektanci farm wiatrowych stają przed wieloma problemami technicznymi i ekonomicznymi, które muszą rozwiązać w początkowym etapie inwestycji [1–3]. Wielokrotnie stają oni przed dylematem wyboru najlepszych i najbardziej ekonomicznych rozwiązań. Standardy gospodarki rynkowej oraz zwykła dbałość o finanse inwestora, wymagają, aby wydatki, na każdym etapie budowy farmy wiatrowej, były jak najniższe.

Określanie struktury sieci wewnętrznej farmy wiatrowej, obejmującej połączenia pomiędzy poszczególnymi turbinami oraz dobór odpowiednich przekrojów kabli, realizujących te połączenia, to drugi pod względem wielkości (po zakupie turbin) nakład inwestycyjny, decydujący o kosztach całego projektu. W praktyce, na tym etapie projektowania, projektant dąży do zapewnienia możliwie najkrótszych połączeń pomiędzy turbinami oraz GPZ farmy wiatrowej [4]. W procesie wyboru struktury połączeń należy uwzględnić sprawy związane z prawem własności gruntów oraz możliwe, ze względów technicznych, trasy prowadzenia kabli. Przy doborze przekrojów kabli priorytetem jest spełnienie, wymaganych przepisami, ograniczeń technicznych, takich jak: dopuszczalna, długotrwała obciążalność prądowa kabli czy dopuszczalne spadki napięć. Nie należy jednak przy tym

zapominać o tym, aby dobór ten zapewnił minimum kosztów zakupu kabli, niezbędnych do realizacji wszystkich zaplanowanych połączeń.

Opisane powyżej etapy projektowania, zazwyczaj wykonywane są w dwóch niezależnych procesach. Jak należało przypuszczać rozdzielone w ten sposób zadania, choć optymalne w pojedynczym działaniu, nie zapewniają najlepszego rozwiązania jednoczesnego, zintegrowanego procesu doboru układu połączeń i przekrojów kabli dla wewnętrznej sieci farmy wiatrowej.

W prezentowanym artykule, autor koncentruje się na sformułowaniu i analizie zintegrowanego algorytmu rozwiązania problemu jednoczesnego określenia doboru struktury połączeń i przekrojów kabli sieci wewnętrznej farmy wiatrowej. Pokazuje możliwości zastosowania metody nieliniowej optymalizacji całkowitoliczbowej (*Mixed Integer Non-linear Programming* – MINLP) [5], do rozwiązania takiego problemu. Przytoczone zostały przykłady obliczeń i porównania wyników dla metod optymalnego doboru struktury połączeń i przekrojów kabli sieci wewnętrznej farmy wiatrowej: dwuetapowej i zintegrowanej.

### 2. MODEL MATEMATYCZNY PROBLEM

Postać funkcji celu:

$$K_{\text{całkowity}} = K_{\text{zakup kabli}} = 3 \cdot \sum_{\substack{i>1 \\ i \neq j}}^{LW} \sum_{j=1}^{LW} \sum_{p=1}^{LPK} L_{j,i} \cdot X_{j,i} \cdot Z_{i,p} \cdot K_p \quad (1)$$

Dobór optymalnej struktury sieci oparty został na algorytmie minimalnego drzewa rozpinającego (*Minimum Spanning Tree*) w postaci uwzględniającej pojedyncze przepływy sieciowe (*single-commodity flow*). Postać odpowiednich równań, realizujący powyższy algorytm, jest następująca [11]:

$$\sum_{i=1}^{LW} X_{i,j} = 1, \quad \forall j = 2 \dots LW \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{LW} Y_{i,j} - \sum_{i>1}^{LW} Y_{j,i} = 1, \quad \forall j = 2 \dots LW \quad (3)$$

$$X_{i,j} \leq Y_{i,j}, \quad \forall i = 1 \dots LW; \forall j = 2 \dots LW \quad (4)$$

$$Y_{i,j} \leq (LW - d_i) \cdot X_{i,j}, \quad \forall i = 1 \dots LW; \forall j = 2 \dots LW \quad (5)$$

Równania sieciowe uzupełniane są równaniami opisującymi ograniczenia techniczne, które są konieczne do spełnienia w projektowanej sieci:

Dopuszczalna, długotrwała obciążalność prądowa dla każdego odcinka linii:

$$\sum_{p=1}^{LPK} Idd_p \cdot Z_{i,p} \geq \sum_{j=1}^{LW} I_{N \text{ turbiny}} \cdot Y_{j,i}, \quad \forall i = 2 \dots LW \quad (6)$$

Dopuszczalne spadki napięcia dla każdego odcinka linii:

$$\sqrt{3} \cdot \sum_{\substack{i>1 \\ i \neq j}}^{LW} \sum_{j=1}^{LW} \sum_{p=1}^{LPK} L_{j,i} \cdot X_{j,i} \cdot I_{N \text{ turbiny}} \cdot Y_{j,i} \cdot Z_{i,p} \cdot (R_p \cos \varphi + XL_p \sin \varphi) \leq \Delta U_{\max}, \quad \forall i = 2 \dots LW \quad (7)$$

Zmienne występujące w powyższych równaniach:

- $X_{i,j}$  – zmienne decyzyjne (binarne) wyboru połączenia pomiędzy węzłami  $i, j$  (wymiar  $LW \times LW$ );
- $Y_{i,j}$  – zmienne przepływów sieciowych pomiędzy węzłami  $i, j$  (wymiar  $LW \times LW$ );
- $Z_{i,p}$  – zmienne decyzyjne (binarne) wyboru danego przekroju kabla dla odcinka  $i, j$  sieci (wymiar  $LW \times LPK$ ).

Symbole i oznaczenia użyte w powyższych równaniach:

- $LW$  – liczba turbin (węzłów sieci wewnętrznej farmy wiatrowej);
- $LPK$  – liczba przekrojów kabli w typoszeregu;
- $L_{i,j}$  – macierz odległości pomiędzy węzłami  $i, j$  (wymiar  $LW \times LW$ ) [km];
- $K_p$  – jednostkowy koszt 1 km kabla o przekroju  $s_j$  z typoszeregu kabli [zł/km];
- $Idd_p$  – dopuszczalna, długotrwała obciążalność kabla o przekroju  $s_j$  z typoszeregu kabli [A];
- $I_{N \text{ turbiny}}$  – prąd znamionowy pojedynczej turbiny [A];
- $R_p$  – rezystancja jednostkowa kabla o przekroju  $s_j$  z typoszeregu kabli [ $\Omega$ /km];
- $XL_p$  – reaktancja indukcyjna, jednostkowa kabla o przekroju  $s_j$  z typoszeregu kabli [ $\Omega$ /km];
- $\Delta U_{\max}$  – maksymalny, dopuszczalny spadek napięcia dla odcinka  $i, j$  linii kablowej.

### 3. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

W celu przetestowania i sprawdzenia przydatności zaproponowanej metody, przeprowadzone zostały obliczenia dla lokalizacji turbin na terenie realnej farmy wiatrowej, dla której przeprowadzana była ekspertyza wpływu przyłączenia tej farmy na pracę KSE. Analizie porównawczej poddane zostały następujące warianty określania optymalnej struktury sieci i doboru kabli:

- Rozdzielny, dwuetapowy algorytm optymalizacyjny, polegający na:
  - określaniu optymalnego układu połączeń pomiędzy turbinami z wykorzystaniem algorytmu minimalnego drzewa rozpinającego (1 etap),
  - optymalny dobór kabli do określonego w 1 etapie układu połączeń (2 etap).

Oba etapy mają postać liniową i do ich rozwiązania możliwe jest bezpośrednie wykorzystanie metod programowania całkowitoliczbowego, z udziałem zmiennych binarnych (MIP).

- Zintegrowany, jednoetapowy algorytm optymalizacji układu połączeń i doboru kabli dla wewnętrznej sieci farmy wiatrowej.

Zastosowany model jest w tym przypadku nieliniowy, całkowitoliczbowy, z udziałem zmiennych binarnych (MINLP). W obliczeniach porównawczych przyjęto, że połączenia pomiędzy turbinami dokonywane są za pomocą

pojedynczej linii kablowej (wykluczono połączenia liniami równoległymi). W obliczeniach wykorzystane zostały następujące „silniki” obliczeniowe:

- AlphaECP (do problem MINLP),
- FICO® Xpress Optimization Suite v. 7.8 64-bit (do problem MIP),
- IBM ILOG CPLEX Optimizer v. 12.6 (do problem MIP),
- GUROBI Optimizer v. 6.0 (do problem MIP).

W artykule wykorzystano dane kabli XRUHAKXS 18/30 kV jednego z wiodących, polskich producentów kabli – firmy TELE-FONIKA Kable Sp. z o.o. S.K.A.

Przedstawione zostały 3 warianty obliczeniowe:

- wariant 1** – porównanie optymalnej struktury sieci przy uwzględnieniu wyłącznie ograniczeń technicznych;
- wariant 2** – porównanie optymalnej struktury sieci przy uwzględnieniu ograniczeń technicznych i określonej liczby sekcji;
- wariant 3** – porównanie optymalnej struktury sieci przy uwzględnieniu ograniczeń technicznych, określonej liczby sekcji i określonej liczby przekrojów kabli.

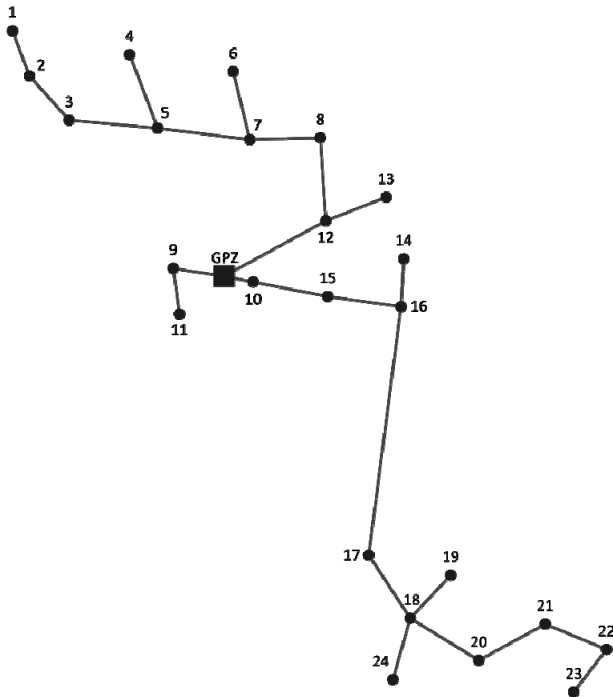
Zestawienie wyników obliczeń, dla otrzymanych struktur sieci wewnętrznej farmy wiatrowej, zaprezentowane zostały na rys. 1÷4 (warianty 1 i 3) oraz przedstawione w tabeli 1 (wszystkie warianty).

### 4. WNIOSKI

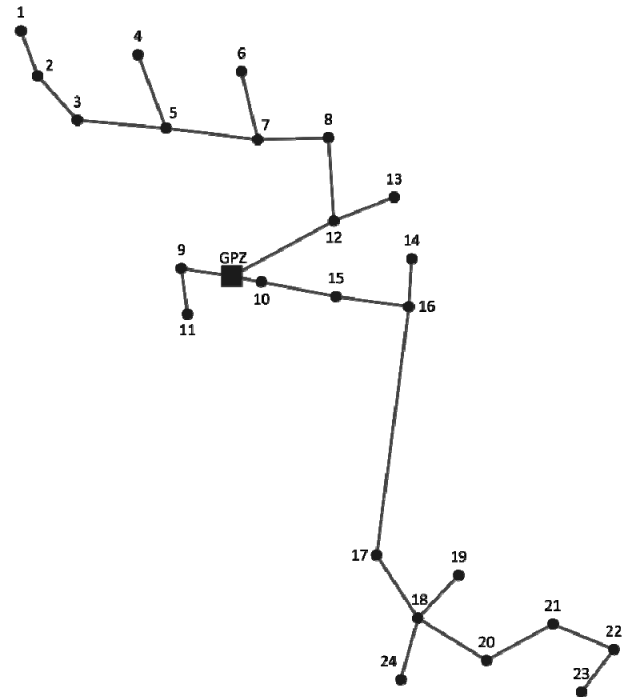
Zaprezentowana w artykule analiza porównawcza dwóch metod określania optymalnej struktury sieci farmy wiatrowej, wykazała, że rozwiązywanie tego problemu w dwóch niezależnych procesach nie zapewnia optymalnego sposobu realizacji inwestycji. Wykazano jednocześnie przydatność wykorzystania metoda nieliniowego programowania całkowitoliczbowego, z udziałem zmiennych binarnych (*Mixed Integer Nonlinear Programming* – MINLP). Wykorzystanie tej metody zapewnia optymalną strukturę sieci przy jednoczesnym, prawidłowym doborze kabli, tworzących tę sieć. Wyniki obliczeń, zestawione w tabeli 2, wykazują jednoznacznie wyższość algorytmu zintegrowanego nad algorytmem dwuetapowym. Korzyści, wynikające ze stosowania metody zintegrowanej mogą osiągnąć nawet ponad 32% kosztów inwestycji.

Należy jednak podkreślić spore kłopoty, związane ze stosowaniem tego algorytmu. Problem jest typu binarnego. Ze względu na obecność iloczynów zmiennych, zarówno we funkcji jak i w ograniczeniach, jest on również nieliniowy i niewypukły (*nonconvex*). Powyższe fakty sprawiają, że:

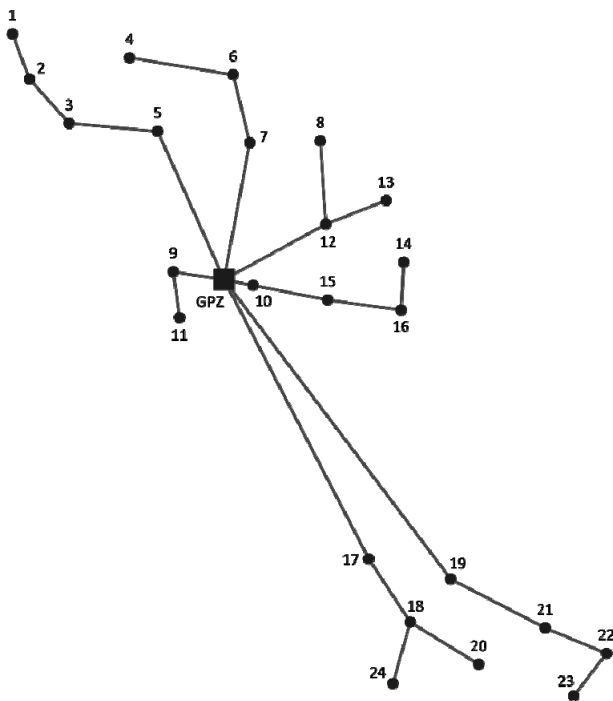
- problem jest bardzo trudny do rozwiązania – jest typu NP-trudnego (*NP-Hard*),
- znalezione rozwiązanie ma charakter lokalny,
- rozwiązanie może zależeć od wyboru punktu startowego,
- niewiele programów obliczeniowych radzi sobie z tego typu problemami, co znacznie zawęża i utrudnia znalezienie rozwiązania – w rozpatrywanym przypadku „poradził” sobie jedynie „silnik” obliczeniowy AlphaECP w połączeniu z GUROBI i FICO® Xpress.
- obliczenia zajmują stosunkowo dużo czasu (w porównaniu z metodami typu MIP) – znalezienie optymalnej struktury sieci zajmowało od ok. 30 s (wariant 1) do kilkuset s (warianty 2 i 3), przy czym wyniki we Wariantach 2 i 3 są takie tylko dzięki zastosowaniu odpowiednich strategii obliczeniowych. W innym przypadku czasy te dochodziły nawet do ponad 10000 s.



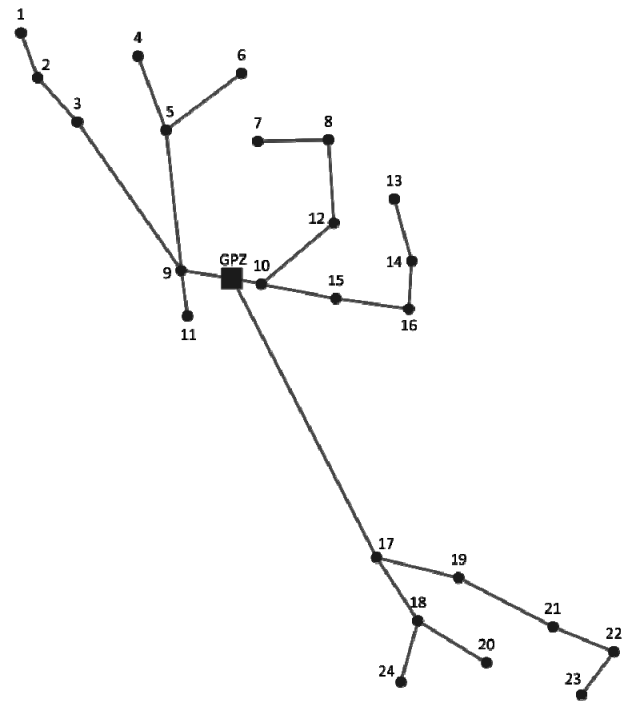
Rys. 1. Struktura sieci przy uwzględnieniu wyłącznie ograniczeń technicznych – algorytm dwuetapowy



Rys. 3. Struktura sieci przy uwzględnieniu ograniczeń technicznych, maksymalnie 3 sekcjach i 3 rodzajach przekrojów kabli – algorytm dwuetapowy



Rys. 2. Struktura sieci przy uwzględnieniu wyłącznie ograniczeń technicznych – algorytm zintegrowany



Rys. 4. Struktura sieci przy uwzględnieniu ograniczeń technicznych, maksymalnie 3 sekcjach i 3 rodzajach przekrojów kabli – algorytm zintegrowany

## 5. KIERUNKI PRZYSZŁYCH BADAŃ

Do najważniejszych kierunków można zaliczyć:

- znalezienie dokładniejszych zależności pomiędzy zmiennymi opisującymi problem, które pozwolą na zwiększenie prędkości działania metody;
- znalezienie prawidłowego przybliżenia liniowego opisanego problemu, które pozwoli z powodzeniem zastosować metody typu MIP, charakteryzujące się dobrą zbieżnością i szybkością działania.

Do problemów technicznych, którymi warto zainteresować się w przyszłości, można zaliczyć przede wszystkim:

- uwzględnienie możliwości prowadzenia linii równoległych na niektórych odcinkach sieci, co może jeszcze bardziej obniżyć koszty całej inwestycji;
- uwzględnienie w obliczeniach problemu minimalizacji strat energii w sieci wewnętrznej farmy wiatrowej.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń dla poszczególnych wariantów obliczeniowych doboru optymalnej struktury sieci wewnętrznej farmy wiatrowej

Zestawienie wyników	Jednostki	Wariant 1		Wariant 2		Wariant 3	
		algorytm dwuetapowy	algorytm zintegrowany	algorytm dwuetapowy	algorytm zintegrowany	algorytm dwuetapowy	algorytm zintegrowany
Długość linii	m	15 169	19 992	15 198	19 092	15 169	17 401
Liczba sekcji	szt.	3	7	2	2	3	3
Liczba przekrojów kabli	szt.	8	2	9	5	3	3
Koszt całkowity	PLN	2 381 317	1 853 905	2 944 363	1 985 128	2 914 631	1 965 868
Różnica kosztów	%	<b>22,15</b>		<b>32,58</b>		<b>32,55</b>	

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Lundberg S., Evaluation of wind farm layouts, *EPE Journal*, Vol. 16, No. 1, s. 14–21, February 2006.
- 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.
- 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.
- Wędzik A., Optymalizacja układu połączeń kablowych na obszarze farmy wiatrowej, *Acta Energetica* 3/20 (2014), s. 144–149, DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2014313.
- Floudas Ch. A. *Nonlinear and Mixed-Integer Optimization: Fundamentals and Applications (Topics in Chemical Engineering)*, Oxford University Press, First Edition October 5, 1995), ISBN-13: 978-0195100563.
- Bertsekas D.P., *Network Optimization: Continuous and Discrete Models*; Athena Scientific, Belmont, MIT Massachusetts, 1998.
- Donovan S., Wind Farm Optimization, Proceedings of the 7th Triennial Conference of the Asia-Pacific Operations Research Society, Manila, 2006.
- 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.
- 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.
- Wu B.Y., Chao K.-M., *Spanning Trees and Optimization Problems*, Chapman & Hall/CRC, 2004.
- Gavish, B. , Topological design of centralized computer networks: Formulations and algorithms, *Networks* 12, 1982, s. 355–377.

## THE INTEGRATED OPTIMIZATION METHOD OF CONNECTION AND CABLES LAYOUT DESIGN FOR A WIND FARM INTERNAL NETWORK

A minimization of investment costs is one of the main objectives of any investor. Therefore, in the design phase, it should seek to determine the optimal structure of the wind farm internal MV distribution network. It should however follow in the integrated form, guaranteeing the optimal network structure and, at the same time, correct parameters of cables, forming this network. In practice this network guarantees the shortest, possible connection between wind turbines and MPS Substation, while at the same time fulfilling the condition of the lowest cost of building such a network. In the article are presented examples of calculation for the real wind farm. Results were compared with cases of the separated process of determining structures of the network and the layout design of cables forming this network.

**Keywords:** Optimization, renewable energy, wind farms