

**Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych /  
Wilibald Winkler, Andrzej Wiszniewski. – wyd. 2 zm., 1 dodr. (PWN). –  
Warszawa, 2017**

Spis treści

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Przedmowa</b>                                                         | <b>11</b> |
| <b>Wykaz ważniejszych oznaczeń</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>Wykaz ważniejszych symboli graficznych</b>                            | <b>15</b> |
| <b>1. Wprowadzenie</b>                                                   | <b>19</b> |
| 1.1. Rola automatyki zabezpieczeniowej w systemie elektroenergetycznym   | 19        |
| 1.2. Strefy działania układów automatyki zabezpieczeniowej eliminacyjnej | 21        |
| 1.3. Wymagania stawiane automatyce zabezpieczeniowej eliminacyjnej       | 22        |
| 1.4. Przegląd zakłóceń objętych działaniem automatyki zabezpieczeniowej  | 25        |
| 1.4.1. Ogólne założenia                                                  | 25        |
| 1.4.2. Zwarcia wielkoprądowe                                             | 25        |
| 1.4.3. Zwarcia doziemne małoprądowe                                      | 28        |
| 1.4.4. Praca niepełnofazowa                                              | 31        |
| 1.4.5. Zwarcia zwojowe w maszynach wirujących i transformatorach         | 33        |
| 1.4.6. Przeciążenia cieplne                                              | 34        |
| 1.4.7. Awarie systemowe                                                  | 35        |
| 1.4.8. Inne rodzaje zakłóceń                                             | 47        |
| 1.5. Ogólna struktura automatyki zabezpieczeniowej                       | 49        |
| <b>2. Zbieranie i wstępne przetwarzanie sygnałów</b>                     | <b>50</b> |
| 2.1. Wprowadzenie                                                        | 50        |
| 2.2. Sygnały prądowe i napięciowe                                        | 51        |
| 2.2.1. Wiadomości ogólne                                                 | 51        |
| 2.2.2. Prądy przejściowe przy zwarciach wielkoprądowych                  | 52        |
| 2.2.3. Prądy przejściowe przy zwarciach małoprądowych                    | 56        |
| 2.3. Przekładniki prądowe                                                | 58        |
| 2.3.1. Przekładniki prądowe konwencjonalne                               | 58        |
| 2.3.2. Przekładniki prądowe niekonwencjonalne                            | 67        |
| 2.3.3. Układy połączeń przekładników prądowych                           | 72        |
| 2.3.4. Dobór przekładników prądowych                                     | 76        |
| 2.3.5. Filtry składowej zerowej prądu                                    | 79        |
| 2.4. Przekładniki napięciowe                                             | 81        |
| 2.4.1. Przekładniki napięciowe indukcyjne                                | 81        |
| 2.4.2. Przekładniki napięciowe pojemnościowe                             | 84        |

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.4.3. Przekładniki napięciowe niekonwencjonalne                                          | 87         |
| 2.5. Zakłócenia we wtórnych obwodach pomiarowych                                          | 89         |
| 2.6. Inne czujniki pomiarowe                                                              | 90         |
| 2.6.1. Czujniki temperatury                                                               | 90         |
| 2.6.2. Czujniki optyczne                                                                  | 91         |
| 2.6.3. Czujniki pola magnetycznego                                                        | 93         |
| <b>3. Przesył sygnałów</b>                                                                | <b>94</b>  |
| 3.1. Wprowadzenie                                                                         | 94         |
| 3.2. Techniczna realizacja łączy telekomunikacyjnych dla automatyki zabezpieczeniowej     | 96         |
| 3.2.1. Łączy przewodowe                                                                   | 96         |
| 3.2.2. Łączy wielkiej częstotliwości                                                      | 97         |
| 3.2.3. Łączy światłowodowe                                                                | 99         |
| 3.2.4. Łączy radiowe                                                                      | 104        |
| <b>4. Przetwarzanie sygnałów w przekaźnikach i zespołach automatyki zabezpieczeniowej</b> | <b>105</b> |
| 4.1. Technika analogowa                                                                   | 105        |
| 4.1.1. Ogólna struktura toru przetwarzania sygnałów                                       | 105        |
| 4.1.2. Układy wejściowe                                                                   | 106        |
| 4.1.3. Układy przygotowawcze                                                              | 106        |
| 4.1.4. Komparatory                                                                        | 112        |
| 4.1.5. Układy decyzyjne                                                                   | 118        |
| 4.1.6. Układy wyjściowe                                                                   | 119        |
| 4.1.7. Układy wejść dwustanowych                                                          | 120        |
| 4.1.8. Układy zasilania pomocniczego                                                      | 121        |
| 4.1.9. Przekaźniki i zespoły automatyki zabezpieczeniowej                                 | 122        |
| 4.2. Technika cyfrowa                                                                     | 125        |
| 4.2.1. Wiadomości wstępne                                                                 | 125        |
| 4.2.2. Dyskretyzacja sygnałów analogowych                                                 | 126        |
| 4.2.3. Wstępne przetwarzanie cyfrowe                                                      | 127        |
| 4.2.4. Pomiary cyfrowe wielkości kryterialnych                                            | 136        |
| 4.2.5. Stosowanie pomiarów rozmytych                                                      | 144        |
| <b>5. Funkcje dodatkowe związane z automatyką zabezpieczeniową</b>                        | <b>147</b> |
| 5.1. Rejestracja zakłóceń                                                                 | 147        |
| 5.1.1. Znaczenie rejestracji zakłóceń                                                     | 147        |
| 5.1.2. Rejestracja zakłóceń za pomocą autonomicznego urządzenia                           | 148        |
| 5.1.3. Rejestracja zakłóceń w urządzeniu zabezpieczającym                                 | 152        |
| 5.1.4. Współpraca urządzeń do rejestracji zakłóceń                                        | 152        |
| 5.1.5. Oprogramowanie urządzeń do rejestracji zakłóceń                                    | 154        |
| 5.2. Lokalizacja zwarcia w liniach elektroenergetycznych                                  | 155        |
| 5.2.1. Źródła błędów w procesie lokalizacji                                               | 155        |
| 5.2.2. Eliminowanie błędów wywołanych rezystancją przejścia                               | 160        |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.3. Eliminowanie błędów spowodowanych sprzężeniem z torem równoległym | 162 |
| 5.2.4. Eliminowanie błędów wywołanych złożoną konfiguracją linii         | 163 |
| 5.2.5. Kompensacja wpływu pojemności linii                               | 164 |
| 5.2.6. Falowe lokalizatory miejsca zwarcia                               | 164 |

## **6. Główne kryteria zabezpieczeniowe i ich praktyczne zastosowanie** **166**

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1. Kryterium nadprądowe                                                                                            | 166 |
| 6.1.1. Kryterium nadprądowe jako podstawa do wykrywania zwarc wielkoprądowych                                        | 166 |
| 6.1.2. Kryterium nadprądowe jako podstawa do wykrywania przeciążeń cieplnych                                         | 172 |
| 6.1.3. Kryterium nadprądowe jako podstawa do wykrywania zwarc doziemnych małoprądowych                               | 173 |
| 6.2. Kryterium nad- i podnapięciowe                                                                                  | 174 |
| 6.2.1. Kryterium nadnapięciowe                                                                                       | 174 |
| 6.2.2. Kryterium podnapięciowe                                                                                       | 176 |
| 6.3. Kryterium różnicowoprądowe                                                                                      | 178 |
| 6.3.1. Zakres zastosowania kryterium                                                                                 | 178 |
| 6.3.2. Ogólna zasada pomiaru prądu różnicowego                                                                       | 179 |
| 6.3.3. Stabilizacja zabezpieczeń różnicowoprądowych                                                                  | 181 |
| 6.4. Kryterium kątowoprądowe                                                                                         | 183 |
| 6.4.1. Zakres stosowania kryterium kątowoprądowego                                                                   | 183 |
| 6.4.2. Zastosowanie kryterium kątowoprądowego do selektywnego wykrywania zwarc wielkoprądowych                       | 184 |
| 6.4.3. Zastosowanie kryterium kątowoprądowego do selektywnego wykrywania zwarc małoprądowych                         | 187 |
| 6.4.4. Zmiana kierunku przepływu mocy czynnej jako kryterium wykrywające pracę silnikową generatorów synchronicznych | 190 |
| 6.5. Kryterium podimpedancyjne                                                                                       | 191 |
| 6.5.1. Zmiana impedancji jako kryterium występowania zwarc wielkoprądowych                                           | 191 |
| 6.5.2. Zasada wyboru napięć i prądów zapewniających prawidłowy pomiar impedancji                                     | 200 |
| 6.5.3. Techniczna realizacja pomiaru impedancji w przekaźnikach odległościowych                                      | 205 |

## **7. Podejmowanie decyzji w automatyce zabezpieczeniowej** **220**

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Wiadomości wstępne                                | 220 |
| 7.2. Stosowanie opóźnień                               | 221 |
| 7.3. Zwiłokrotnianie zabezpieczeń                      | 222 |
| 7.4. Układy adaptacyjne                                | 223 |
| 7.4.1. Rola układów adaptacyjnych                      | 223 |
| 7.4.2. Modele deterministyczne i logika dwuwartościowa | 224 |

|                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.4.3. Algorytmy oparte na sygnałach rozmytych oraz logice rozmytej                         | 225        |
| 7.4.4. Algorytmy wielokryterialne                                                           | 226        |
| 7.4.5. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych                                            | 228        |
| <b>8. Automatyka zabezpieczeniowa linii elektroenergetycznych</b>                           | <b>231</b> |
| 8.1. Wprowadzenie                                                                           | 231        |
| 8.2. Automatyka zabezpieczeniowa do wykrywania zwarć wielkoprądowych                        | 233        |
| 8.2.1. Zabezpieczenia nadprądowe                                                            | 233        |
| 8.2.2. Zabezpieczenia odległościowe bezłączowe                                              | 233        |
| 8.2.3. Współpraca zabezpieczeń odległościowych za pomocą łączy telekomunikacyjnych          | 246        |
| 8.2.4. Zabezpieczenia porównawczoprądowe wzdłużne                                           | 254        |
| 8.2.5. Zabezpieczenia porównawczofazowe                                                     | 263        |
| 8.2.6. Zabezpieczenia zerowoprądowe kierunkowe                                              | 267        |
| 8.2.7. Zabezpieczenie porównawczokierunkowe wykorzystujące niestacjonarne sygnały pomiarowe | 270        |
| 8.3. Automatyka zabezpieczeniowa do wykrywania i lokalizacji zwarć doziemnych małoprądowych | 273        |
| 8.3.1. Zabezpieczenia reagujące na ustalone przebiegi wielkości pomiarowych                 | 273        |
| 8.3.2. Zabezpieczenia reagujące na przejściowe przebiegi wielkości pomiarowych              | 278        |
| 8.4. Zabezpieczenia linii elektroenergetycznych od przeciążeń                               | 279        |
| 8.5. Automatyka samoczynnego ponownego załączania (SPZ)                                     | 281        |
| 8.5.1. Wiadomości podstawowe                                                                | 281        |
| 8.5.2. Automatyka SPZ w sieciach z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym               | 283        |
| 8.5.3. Automatyka SPZ w sieciach rozdzielczych SN                                           | 286        |
| 8.5.4. Wybiorniki fazowe do współpracy z automatyką SPZ                                     | 288        |
| <b>9. Automatyka zabezpieczeniowa transformatorów i autotransformatorów</b>                 | <b>291</b> |
| 9.1. Zakłócenia w pracy transformatorów i autotransformatorów                               | 291        |
| 9.1.1. Awaryjność transformatorów                                                           | 291        |
| 9.1.2. Rodzaje zakłóceń w pracy transformatorów                                             | 292        |
| 9.2. Wymagania stawiane zabezpieczeniom transformatorów                                     | 296        |
| 9.3. Zabezpieczenia różnicowe wzdłużne transformatorów                                      | 297        |
| 9.4. Zabezpieczenia nadprądowe transformatorów                                              | 302        |
| 9.5. Zabezpieczenia odległościowe transformatorów                                           | 306        |
| 9.6. Zabezpieczenie gazowo-przepływowe                                                      | 307        |
| 9.7. Zabezpieczenia przeciążeniowe transformatorów                                          | 309        |
| 9.8. Zabezpieczenie od nadmiernego strumienia w rdzeniu transformatorów                     | 310        |
| <b>10. Automatyka zabezpieczeniowa szyn zbiorczych</b>                                      | <b>311</b> |

|                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.1. Wprowadzenie                                                                                    | 311        |
| 10.2. Zabezpieczenia różnicowoprądowe szyn zbiorczych                                                 | 315        |
| 10.2.1. Małoimpedancyjne zabezpieczenia różnicowoprądowe                                              | 315        |
| 10.2.2. Wielkoimpedancyjne zabezpieczenia różnicowe                                                   | 319        |
| 10.3. Dwukryterialne zabezpieczenia szyn zbiorczych                                                   | 325        |
| 10.3.1. Zabezpieczenia analogowe                                                                      | 325        |
| 10.3.2. Zabezpieczenia cyfrowe                                                                        | 330        |
| 10.4. Uprozczone zabezpieczenie szyn zbiorczych sieci rozdzielczych SN                                | 334        |
| 10.5. Lokalne rezerwowanie wyłączników                                                                | 335        |
| <b>11. Automatyka zabezpieczeniowa generatorów</b>                                                    | <b>338</b> |
| 11.1. Wprowadzenie                                                                                    | 338        |
| 11.2. Zabezpieczenia od zwarć doziemnych w uzwojeniu stojana                                          | 339        |
| 11.2.1. Przyczyny i skutki występowania zwarć doziemnych                                              | 339        |
| 11.2.2. Zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana generatorów pracujących bezpośrednio na szyny zbiorcze | 340        |
| 11.2.3. Zabezpieczenia ziemnozwarciowe generatorów pracujących w układach blokowych                   | 343        |
| 11.3. Zabezpieczenia od zwarć międzyfazowych w uzwojeniu stojana                                      | 351        |
| 11.3.1. Wiadomości ogólne                                                                             | 351        |
| 11.3.2. Zabezpieczenie różnicowoprądowe                                                               | 352        |
| 11.3.3. Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne z blokadą napięciową                                       | 354        |
| 11.3.4. Zabezpieczenie podimpedancyjne                                                                | 355        |
| 11.4. Zabezpieczenia od zwarć zwojowych w uzwojeniu stojana                                           | 356        |
| 11.5. Zabezpieczenie od zwarć w wirniku i obwodzie wzbudzenia                                         | 359        |
| 11.6. Zabezpieczenie nadnapięciowe                                                                    | 363        |
| 11.7. Zabezpieczenie od utraty wzbudzenia                                                             | 363        |
| 11.8. Zabezpieczenia od asymetrii prądowej                                                            | 365        |
| 11.9. Zabezpieczenia od przeciążeń cieplnych                                                          | 367        |
| 11.10. Zabezpieczenia pod- i nadczęstotliwościowe                                                     | 368        |
| 11.11. Zabezpieczenia od pracy silnikowej turbogeneratorów                                            | 370        |
| 11.12. Ogólna zasada doboru zabezpieczeń generatorów                                                  | 371        |
| <b>12. Automatyka zabezpieczeniowa bloków generator-transformator</b>                                 | <b>378</b> |
| 12.1. Wprowadzenie                                                                                    | 378        |
| 12.2. Zabezpieczenia od zwarć wielkoprądowych                                                         | 380        |
| 12.2.1. Rodzaje zabezpieczeń                                                                          | 380        |
| 12.2.2. Zabezpieczenia różnicowoprądowe                                                               | 380        |
| 12.2.3. Zabezpieczenia podimpedancyjne                                                                | 381        |
| 12.3. Zabezpieczenia od utraty synchronizmu                                                           | 382        |
| 12.4. Zabezpieczenia od przewzbudzenia                                                                | 384        |
| 12.5. Zabezpieczenia od przypadkowego przyłączenia turbozespołu do systemu elektroenergetycznego      | 385        |

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.6. Zabezpieczenie od nadmiernego momentu skręcającego na wale turbozespołu     | 387        |
| 12.7. Wytyczne doboru automatyki zabezpieczeniowej bloków generator-transformator | 389        |
| 12.8. Dystrybucja sygnałów wyjściowych z zespołów automatyki zabezpieczeniowej    | 391        |
| <b>13. Automatyka zabezpieczeniowa silników elektrycznych</b>                     | <b>394</b> |
| 13.1. Wprowadzenie                                                                | 394        |
| 13.2. Zakłócenia w pracy silników                                                 | 394        |
| 13.3. Zabezpieczenia silników indukcyjnych                                        | 398        |
| 13.3.1. Zabezpieczenia zwarciove                                                  | 398        |
| 13.3.2. Zabezpieczenia przeciążeniowe i rezerwowe                                 | 401        |
| 13.4. Specyfika zabezpieczeń silników synchronicznych                             | 405        |
| 13.5. Zintegrowane zabezpieczenia silników                                        | 406        |
| <b>14. Automatyka przeciwawaryjna i poawaryjna</b>                                | <b>407</b> |
| 14.1. Wiadomości wstępne                                                          | 407        |
| 14.2. Przeciwdziałanie utracie równowagi statycznej                               | 410        |
| 14.3. Przeciwdziałanie utracie równowagi przejściowej                             | 411        |
| 14.4. Układy rozcinające                                                          | 414        |
| 14.5. Przeciwdziałanie niestabilności napięciowej                                 | 417        |
| 14.5.1. Warunki powstawania niestabilności napięciowej                            | 417        |
| 14.5.2. Podnapięciowe odciążanie                                                  | 418        |
| 14.5.3. Przeciwdziałanie nadmiernemu podwyższeniu poziomu napięć                  | 421        |
| 14.6. Przeciwdziałanie załamaniu się częstotliwości                               | 422        |
| 14.7. Zapobieganie przeciążeniom cieplnym                                         | 424        |
| 14.8. Restytucja poawaryjna w systemie elektroenergetycznym                       | 427        |
| 14.8.1. Wprowadzenie                                                              | 427        |
| 14.8.2. Samoczynne załączanie rezerwy (SZR)                                       | 427        |
| 14.8.3. Restytucja stacji i systemu                                               | 430        |
| <b>15. Przyszłość automatyki elektroenergetycznej</b>                             | <b>432</b> |
| 15.1. Nowe zadania i środki                                                       | 432        |
| 15.2. Obszarowa synchronizacja próbkowania                                        | 433        |
| 15.3. Integracja układów sterowania                                               | 434        |
| 15.4. Zmiany w automatyce zabezpieczeniowej                                       | 438        |
| <b>Literatura</b>                                                                 | <b>441</b> |
| <b>Skorowidz</b>                                                                  | <b>447</b> |