

# Spis treści

Przedmowa 11

Wykaz ważniejszych oznaczeń 13

Wykaz ważniejszych symboli graficznych 15

1. Wprowadzenie 19

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. Przeciżenia cieplne 34

1.4.7. Awarie systemowe 35

1.4.8. Inne rodzaje zakłóceń 47

1.5. Ogólna struktura automatyki zabezpieczeniowej 49

2. Zbieranie i wstępne przetwarzanie sygnałów 50

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
- 3. Przesył sygnałów 94
  - 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
- 4. Przetwarzanie sygnałów w przekaźnikach i zespołach automatyki zabezpieczeniowej 105
  - 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. Pomiar cyfrowy wielkości kryterialnych                                          | 136 |
| 4.2.5. Stosowanie pomiarów rozmytych                                                   | 144 |
| 5. Funkcje dodatkowe związane z automatyką zabezpieczeniową                            | 147 |
| 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 zwarć wielkoprądowych          | 166 |
| 6.1.2. Kryterium nadprądowe jako podstawa do wykrywania przeciążeń cieplnych           | 172 |
| 6.1.3. Kryterium nadprądowe jako podstawa do wykrywania zwarć 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 opóźnienia                                                                                           | 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 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8. Automatyka zabezpieczeniowa linii elektroenergetycznych                                  | 231 |
| 8.1. Wprowadzenie                                                                           | 231 |
| 8.2. Automatyka zabezpieczeniowa do wykrywania zwarć wieloprądowych                         | 233 |
| 8.2.1. Zabezpieczenia nadprądowe                                                            | 233 |
| 8.2.2. Zabezpieczenia odległościowe bezłączowe                                              | 233 |
| 8.2.3. Współpraca zabezpieczeń odległościowych za pomocą łącz 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 |
| 9. Automatyka zabezpieczeniowa transformatorów i autotransformatorów                        | 291 |
| 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 |
| 10. Automatyka zabezpieczeniowa szyn zbiorczych                                                       | 311 |
| 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 |
| 11. Automatyka zabezpieczeniowa generatorów                                                           | 338 |
| 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 nad napięciowe 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
- 12. Automatyka zabezpieczeniowa bloków generator-  
transformator 378
  - 12.1. Wprowadzenie 378
  - 12.2. Zabezpieczenia od zwarć wieloprądowych 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
- 13. Automatyka zabezpieczeniowa silników elektrycznych 394
  - 13.1. Wprowadzenie 394
  - 13.2. Zakłócenia w pracy silników 394
  - 13.3. Zabezpieczenia silników indukcyjnych 398
    - 13.3.1. Zabezpieczenia zwarciorowe 398
    - 13.3.2. Zabezpieczenia przeciążeniowe i rezerwowe 401

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.4. Specyfika zabezpieczeń silników synchronicznych            | 405 |
| 13.5. Zintegrowane zabezpieczenia silników                       | 406 |
| 14. Automatyka przeciawawaryjna i poawaryjna                     | 407 |
| 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 |
| 15. Przyszłość automatyki elektroenergetycznej                   | 432 |
| 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 |
| Literatura                                                       | 441 |
| Skorowidz                                                        | 447 |