

# PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

Zveřejněná podle §31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

**2024-37**

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

*G01R 31/14* (2006.01)  
*G01R 31/00* (2006.01)  
*G01R 31/18* (2006.01)  
*G01R 31/27* (2006.01)  
*G01R 31/42* (2006.01)  
*G01R 19/165* (2006.01)  
*G01R 23/16* (2006.01)  
*H02K 19/16* (2006.01)

(19)  
ČESKÁ  
REPUBLIKA



ÚŘAD  
PRŮMYSLOVÉHO  
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **31.01.2024**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **01.01.2025**  
(Věstník č. 1/2025)

(71) Přihlašovatel:  
Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, Jižní  
Předměstí, CZ

(72) Původce:  
prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D., Plzeň, Červený  
Hrádek, CZ  
Ing. Jiří Cibulka, Ph.D., Plzeň, Jižní Předměstí, CZ

(74) Zástupce:  
Langrova, s.r.o., Skrétova 1011/48, 301 00 Plzeň,  
Jižní Předměstí

(54) Název přihlášky vynálezu:  
**Způsob detekce poruchy rotačního  
usměrňovače bezkroužkových synchronních  
strojů s rotačními budiči asynchronního  
typu**

(57) Anotace:  
Při způsobu detekce poruchy rotačního  
usměrňovače (4) bezkroužkového synchronního  
stroje (6) se měří fázový budicí proud (3) na  
stacionární straně zdroje (2) buzení. Dále se  
frekvenční analýzou (12) ze změřeného signálu  
vyhodnotí amplituda základní harmonické a  
amplitudy všech nenulových celistvých násobků  
základní harmonické frekvence. Vypočte se  
bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy, změří se  
bezporuchový referenční bezrozměrný faktor  $X_{i\_ref}$ ,  
a stanoví se poruchový referenční bezrozměrný  
faktor  $X_{i\_err}$  a určí se bezrozměrná mez  $X_{i\_threshold}$   
detekce poruchy. Porucha se signalizuje v případě,  
že jsou překročeny stanovené hodnoty  
bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy a/nebo efektivní  
hodnota změřeného fázového budicího proudu (3)  
je mimo povolený provozní rozsah a/nebo efektivní  
hodnota indukovaného napětí synchronního stroje  
(1) je menší než údaj odpovídající minimální  
povolené provozní efektivní hodnotě fázového  
budicího proudu (3).

## Způsob detekce poruchy rotačního usměrňovače bezkroužkových synchronních strojů s rotačními budiči asynchronního typu

### 5 Oblast techniky

Technické řešení se týká detekce a případně i určení typu poruchy u polovodičových součástek rotačního usměrňovače bezkroužkových synchronních strojů, zejména pak pracujících ve funkci kompenzátoru jalového výkonu v elektrické síti. Navržené řešení je určeno pro bezkroužkové synchronní stroje mající rotační budiče asynchronního typu. Tento typ rotačního budiče se u synchronních kompenzátorů používá téměř výhradně, neboť je pro jejich rozběh zcela nepostradatelné, aby došlo k nabuzení stroje i při nulových otáčkách, což z podstaty věci u rotačních budičů inverzního synchronního typu není možné.

15

### Dosavadní stav techniky

Konvenční metoda diagnostikování poruch stacionárních usměrňovačů, jež je založena na kontinuálním vyhodnocování úbytků napětí na jednotlivých polovodičových součástkách, či publikovaný způsob detekce poruch vycházející z měření a vzájemném porovnání střední či efektivní hodnoty jednotlivých fázových proudů na střídavé straně stacionárních usměrňovačů (viz např. článek: *N. M. A. Freire, J. O. Estima and A. J. Marques Cardoso, "Open-Circuit Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 9, pp. 3957-3967, Sept. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2207655*), nejsou z konstrukční podstaty aplikovatelné u usměrňovačů rotačních, které se nachází na rotorech bezkroužkových synchronních strojů. Při některých známých metodách diagnostiky poruchy usměrňovačů se využívá pulznosti diagnostikovaného usměrňovače. Pulznost je definována jako poměr mezi frekvencí první harmonické střídavé složky usměrněného napětí a první harmonické napětí na střídavé straně usměrňovače.

30

Pokud nejsou poruchy polovodičových součástek rotačních usměrňovačů bezkroužkových synchronních kompenzátorů spolehlivě diagnostikovány, dochází při jejich provozu k proudovému přetěžování rotačních budičů, a tedy i k jejich enormnímu tepelnému ohřevu. To má za následek rychlejší stárnutí izolace rotačních budičů a může to znamenat potenciální vznik velkých hospodářských škod.

35

Jsou známa technická řešení, jejichž základem je vyhodnocování poruchy systému buzení na základě měření rozptylového magnetického pole bezkroužkových synchronních strojů, jako například v dokumentu ES 2738649 A1 a ES 2738649 B2. Tento způsob řešení však vyžaduje montáž speciálních senzorů na měření rozptylového magnetického pole, což není vždy možné, a navíc je to finančně nákladné.

40

Níže uvedený vynález umožňuje spolehlivou detekci poruch polovodičových součástek rotačních usměrňovačů u bezkroužkových synchronních strojů majících rotační budiče asynchronního typu, a to bez nutnosti montáže dodatečných speciálních senzorů a jiné měřicí instrumentace. Vynález využívá pouze měřicí instrumentaci, která je již v předmětných strojích běžně zahrnuta pro zajištění jejich provozu.

45

### 50 Podstata vynálezu

Podstatou vynálezu je způsob diagnostikování poruch rotačních usměrňovačů u bezkroužkových synchronních strojů majících rotační budiče asynchronního typu. Správná funkce diagnostického algoritmu předpokládá, že poměry v bezkroužkovém synchronním stroji jsou navrženy tak, že v bezporuchovém stavu stroje pracuje rotační usměrňovač v oblasti nepřerušovaných proudů.

55

Dále musí platit, že směr otáčení prostorového vektoru 1. harmonické napájecího napětí u zařízení s rotační magnetickou vazbou je opačný oproti rotaci prostorového vektoru napětí sítě, na níž je bezkroužkový synchronní stroj přifázován. Rovněž musí být splněna i podmínka, že velikost frekvence 1. harmonické napájecího napětí zařízení s rotační magnetickou vazbou je  
 5 totožná s velikostí frekvence napětí sítě, na níž je bezkroužkový synchronní stroj přifázován. Za poruchu je u diagnostikovaného rotačního usměřovače považována situace, kdy v místě vadné polovodičové součástky dochází ke zkratu či trvalému rozpojení obvodu. Způsob detekce je založen na vyhodnocení míry zastoupení podílu vyšších harmonických ve frekvenčním spektru jednoho z měřených fázových proudů, který vstupuje do zařízení s rotační magnetickou vazbou.

10

Frekvenční analýzou z měřeného fázového budicího proudu vstupujícího do zařízení s rotační magnetickou vazbou je získána amplituda základní harmonické, jejíž frekvence je rovna frekvenci napájecí sítě, k níž je bezkroužkový synchronní stroj přifázován. Dále je získána amplituda všech nenulových celistvých násobků základní harmonické až do součtu hodnoty  
 15 frekvence napájecí sítě a hodnoty dané součinem frekvence střídavého napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměřovače a jeho pulznosti  $p$ . Získané hodnoty amplitud frekvenčního spektra měřeného fázového budicího proudu vstupujícího do zařízení s rotační magnetickou vazbou se použijí pro výpočet bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy podílem.

Čítatel je součet hodnot amplitud vyhodnocených frekvenčních složek měřeného fázového budicího proudu zdroje buzení majících frekvenci vyšší, než je frekvence základní harmonické, avšak s vyloučením dvou frekvenčních složek. Hodnota frekvence první vyloučené frekvenční složky je rovna součinu frekvence střídavého napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměřovače a jeho pulznosti  $p$ , který se zvýší o hodnotu frekvence napájecí sítě, k níž je  
 25 bezkroužkový synchronní stroj přifázován. Hodnota frekvence druhé vyloučené frekvenční složky je rovna součinu frekvence střídavého napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměřovače a jeho pulznosti  $p$ , který se sníží o hodnotu frekvence napájecí sítě, k níž je bezkroužkový synchronní stroj přifázován.

30 Jmenovatel je součet hodnot amplitud řečených dvou vyloučených frekvenčních složek fázového budicího proudu vstupujícího do statoru zařízení s rotační magnetickou vazbou.

V bezporuchovém stavu se změří bezporuchový referenční bezrozměrný faktor  $X_{i-ref}$ . Poté se provede elektrické odpojení alespoň jedné výkonové polovodičové součástky rotačního usměřovače a vyhodnotí se poruchový referenční bezrozměrný faktor  $X_{i-err}$ . Aritmetickým  
 35 průměrem hodnot bezporuchového referenčního bezrozměrného faktoru  $X_{i-ref}$  a poruchového referenčního bezrozměrného faktoru  $X_{i-err}$  se určí bezrozměrná mez  $X_{i-threshold}$  detekce poruchy.

Následně se při provozu rotačního usměřovače kontinuálně vypočítává bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy. V dalším kroku se zkoumá odstup aktuální hodnoty bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy od bezporuchového stavu reprezentovaného bezporuchovým referenčním bezrozměrným faktorem  $X_{i-ref}$ .

K spolehlivé detekci mezních poruchových stavů se u rotačního usměřovače navíc snímá svorkové napětí synchronního stroje. Za mezní poruchový stav je u diagnostikovaného rotačního usměřovače, a tedy zdroje buzení, považován případ, kdy na jeho výstupních stejnosměrných svorkách dochází k trvalému zkratu, nebo když je minimálně jeden z jeho stejnosměrných pólů trvale odpojen od budicího vinutí synchronního stroje, který tvoří společně s rotačním budičem a rotačním usměřovačem bezkroužkový synchronní stroj. Trvalé odpojení jednoho ze  
 50 stejnosměrných pólů rotačního usměřovače nastává tehdy, když u všech polovodičových součástek náležících do jeho katodové nebo anodové skupiny dojde při poruše k trvalému rozpojení obvodu.

Porucha zdroje buzení se signalizuje v případě, že po dokončení procedury nabuzení  
 55 synchronního stroje indikované signálem nastane alespoň jedna z těchto situací:

- bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy je větší než bezrozměrná mez  $X_{i\_threshold}$  detekce poruchy po dobu delší než jedna perioda základní harmonické frekvence;
- 5 – efektivní hodnota změřeného fázového budicího proudu je mimo povolený provozní rozsah;
- efektivní hodnota indukovaného napětí synchronního stroje je při fázovém budicím proudu, jehož velikost efektivní hodnoty se nachází v povoleném provozním rozsahu definovaném pro daný synchronní stroj, menší než efektivní hodnota indukovaného napětí synchronního stroje
- 10 určená pro minimální povolenou provozní efektivní hodnotu fázového budicího proudu, přičemž indukované napětí synchronního stroje je určeno z měřeného svorkového napětí.

Pro určení polovodičových součástí, u nichž došlo u rotačního usměřovače k poruše, je nutné stanovit jeho elektrický úhel. Ten lze vyhodnotit z matematického modelu asynchronního stroje, který popisuje chování zařízení s rotační magnetickou vazbou. Pro nalezení elektrického úhlu rotačního usměřovače je možné použít napěťový nebo proudový model asynchronního motoru, do nichž vstupují prostorový vektor střídavého napájecího napětí, prostorový vektor budicího proudu vypočtený ze změřených fázových budicích proudů, poloha nebo otáčivá rychlost rotoru synchronního stroje a parametry náhradního schématu zařízení s rotační magnetickou vazbou. Prostorový vektor rotorového napětí je vypočítán jako součet derivace prostorového vektoru rotorového toku zařízení s rotační magnetickou vazbou a úbytku napětí na rotorovém odporu. Přičemž úbytek napětí na rotorovém odporu lze obvykle zanedbat. Rovnice pro výpočet napětí rotoru musí být vypočítána v souřadném systému rotoru. Elektrický úhel rotačního usměřovače je pak roven poloze vypočteného vektoru rotorového napětí v souřadném systému rotoru.

Zjednodušeně lze elektrický úhel rotačního usměřovače určit pomocí polohy rotoru zařízení s rotační magnetickou vazbou a polohy vektoru střídavého napájecího napětí ve stojícím souřadném systému. Algoritmus zde vychází z předpokladu, že rotor zařízení s rotační magnetickou vazbou se otáčí opačným směrem než vektor střídavého napájecího napětí.

Ve všech výše uvedených výpočtech jsou prostorové vektory veličin typicky stanovovány prostřednictvím Clarkové transformace. Vyhodnocování elektrického úhlu rotačního usměřovače může být prováděno průběžně po celou dobu provozu nebo jednorázově po detekci poruchy. Na základě takto stanoveného elektrického úhlu diagnostikovaného rotačního usměřovače lze určit takt vedení součástí, při nichž dochází k anomálnímu tvaru v časovém průběhu měřeného fázového budicího proudu vstupujícího do zařízení s rotační magnetickou vazbou.

Zdroje buzení, jejichž součástí jsou rotační usměřovače, které lze diagnostikovat na základě navrženého bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy, mají typicky, nikoliv však výlučně, níže uvedenou topologii:

Součástí zdroje buzení je rotační usměřovač, jehož stejnosměrné svorky jsou galvanicky spojeny s budicím vinutím synchronního stroje. Střídavé svorky rotačního usměřovače jsou připojeny k zařízení s rotační magnetickou vazbou (typicky jde o rotační budič asynchronního typu nacházející se na společné hřídeli se synchronním strojem). Zařízení s rotační magnetickou vazbou je napájeno z třífázového střídavého zdroje s proměnou velikostí amplitudy první harmonické svorkového napětí (typicky se jedná buď o nepřímý měnič kmitočtu realizovaný třífázovým napěťovým střídačem, nebo o třífázový plně řízený střídavý měnič napětí). První harmonická napájecího napětí zařízení s rotační magnetickou vazbou má co do velikosti frekvenci totožnou s frekvencí napětí sítě, na níž je bezkroužkový synchronní stroj přifázován. Sled fází třífázového zdroje s proměnou velikostí amplitudy první harmonické, jenž napájí zařízení s rotační magnetickou vazbou, je však opačný oproti napětí sítě, na níž je bezkroužkový synchronní stroj přifázován.

55

Popsaným způsobem lze detekovat poruchu u jedné či více polovodičových součástí diagnostikovaného rotačního usměřovače. Typ poruchy je vyhodnocován na základě velikosti efektivní hodnoty indukovaného napětí hlavního synchronního stroje a z porovnání bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy s předem vypočtenými nebo experimentálně určenými hodnotami pro jednotlivé typy poruch, které jsou uloženy v řídicím počítači.

Popsaný vynález překonává existující řešení ochran rotačních usměřovačů pracujících při nepřerušovaném proudu u bezkroužkových synchronních strojů majících rotační budič asynchronního typu tím, že je schopen spolehlivě detekovat poruchu a určit i její typ. Navržené řešení vystačí s běžným HW vybavením řídicích počítačů (typicky regulátorů buzení). Nevyžaduje žádné dodatečné prvky a je velmi jednoduché a robustní z hlediska jeho ladění. Ladění spočívá v nastavení pouze jednoho parametru, kterým je bezrozměrná mez  $X_{i\_threshold}$  detekce poruchy.

### Objasnění výkresů

Příkladné provedení navrhovaného řešení, jehož účelem je diagnostikovat poruchy polovodičových součástí u rotačních usměřovačů, které pracují při nepřerušovaném proudu u bezkroužkových synchronních kompenzátorů mající rotační budič asynchronního typu, je popsáno s odkazem na výkresy, kde je na:

obr. 1 – topologie zapojení synchronního stroje se zdrojem buzení tvořeným zařízením s rotační magnetickou vazbou, na jehož výstupu je připojen rotační usměřovač; člen s rotační magnetickou vazbou je napájen z třífázového střídavého zdroje s proměnou velikostí amplitudy první harmonické svorkového napětí, který je typicky realizován nepřímým měničem frekvence s napětiovým střídačem, nebo se jedná o třífázový plně řízený střídavý měnič napětí;

obr. 2 – principiální blokové schéma algoritmu na detekci poruch polovodičových součástí u rotačních usměřovačů, jež jsou provozovány při nepřerušovaném proudu u bezkroužkových synchronních strojů mající rotační budič asynchronního typu.

### Příklady uskutečnění vynálezu

V příkladném provedení na obr. 1 je popisována aplikace, u které typicky pracuje rotační usměřovač 4 při nepřerušovaném proudu. Tím je u něj splněna jedna ze základních podmínek pro diagnostikování poruch jeho polovodičových součástí na základě metody uvedené v tomto vynálezu. Jedná se o topologii obvodu buzení bezkroužkových synchronních strojů 6 majících rotační budiče asynchronního typu. U nich je nedílnou součástí zdroje 2 buzení synchronního stroje 1 rotační usměřovač 4. Bezkrúžkový synchronní stroj 6 je tvořen uskupením, jež obsahuje zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou (typicky jde o rotační budič asynchronního typu nacházející se na společné hřídeli se synchronním strojem 1), rotační usměřovač 4 a synchronní stroj 1. Zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou je napájeno z třífázového střídavého zdroje 7 buzení s proměnou velikostí amplitudy první harmonické svorkového napětí (typicky se jedná buď o nepřímý měnič frekvence s napětiovým střídačem, nebo o třífázový plně řízený střídavý měnič napětí). První harmonická střídavého napájecího napětí 11 zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou má co do velikosti frekvenci totožnou s frekvencí napětí sítě, na níž je bezkroužkový synchronní stroj 6 přifázován. Sled fázi třífázového střídavého zdroje 7 buzení s proměnou velikostí amplitudy první harmonické, jež napájí zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou, je však opačný oproti napětí sítě, na níž je bezkroužkový synchronní stroj 6 přifázován.

Princip detekce poruch rotačních usměřovačů 4 je založen u bezkroužkových synchronních strojů 6 s rotačním budičem asynchronního typu na frekvenční (Fourierově) analýze jednoho z měřených fázových budících proudů 3 vstupujících do zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou.

Za tím účelem jsou v bloku 12 výpočtu získány z harmonické analýzy amplitudy všech nenulových celistvých násobků základní harmonické frekvence až do harmonické rovnající se součtu hodnoty frekvence napájecí sítě a hodnoty dané součinem frekvence střídavého napájecího napětí rotačního usměřovače 4 a jeho pulznosti  $p$ . Hodnota základní harmonické frekvence je přitom rovna frekvenci napájecí sítě, k níž je bezkroužkový synchronní stroj 6 5  
přifázován. Řešená frekvence se co do velikosti shoduje i s frekvencí 1. harmonické střídavého napájecího napětí 11 zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou. Diagnostikování poruchy polovodičových součástek rotačního usměřovače 4 se provádí pomocí bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy vypočteným v bloku 13 výpočtu faktoru poruchy. Překročí-li kontinuálně 10  
vyhodnocovaný bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy definovanou bezrozměrnou mez  $X_{i\_threshold}$  detekce poruchy (viz blok 14) po dobu delší než jedna perioda základní harmonické frekvence, je signálem 20 indikována porucha rotačního usměřovače 4. Vzhledem k tomu, že příčinou poruchy zdroje 2 buzení může být rotační usměřovač 4 nebo mezní poruchový stav, je výsledný signál 22 poruchy zdroje 2 buzení určen logickým součtem signálu 20 poruchy rotačního 15  
usměřovače 4 a výstupu z logiky sloužící k detekci mezního poruchového stavu, do které vstupuje signál 21 dokončení nabuzovací procedury, viz obr. 2.

Tato logika zajišťuje detekci poruchy u topologie na obr. 1 během řádného provozu bezkroužkového synchronního stroje 6 (tj. byla ukončena procedura nabuzení synchronního stroje 1, což je indikováno signálem 21 dokončení)) i v případě, že efektivní hodnota indukovaného napětí synchronního stroje 1 při fázovém budicím proudu 3, jehož velikost efektivní hodnoty se nachází v povoleném provozním rozsahu definovaném pro daný bezkroužkový synchronní stroj 6, je menší, než efektivní hodnota indukovaného napětí synchronního stroje 1 určená pro minimální povolenou provozní efektivní hodnotu fázového budicího proudu 3. Pro určení výše popsaného indukovaného napětí synchronního stroje 1 je 20  
použito měřené svorkové napětí 9. Procedurou nabuzení se myslí stav, kdy synchronní stroj 1 vyjede na provozní otáčky a požadovaná efektivní hodnota fázového budicího proudu 3 se zvýší z 0 na požadovanou hodnotu odvozenou od síťového napětí.

Ladění navržené metody spočívá v nastavení bezrozměrné meze  $X_{i\_threshold}$  detekce poruchy, viz 30  
blok 14. Ladění je provedeno tak, že bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy je změřen v bezporuchovém stavu stroje a tím se určí bezporuchový referenční bezrozměrný faktor  $X_{i\_ref}$ .

Dále je bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy měřen při umělé poruše, kdy v rotačním usměřovači 4 35  
nevede jedna výkonová polovodičová součástka. Tím se určí poruchový referenční bezrozměrný faktor  $X_{i\_err}$ . Bezrozměrná mez  $X_{i\_threshold}$  detekce poruchy (viz blok 14) je určena aritmetickým průměrem hodnot bezporuchového referenčního bezrozměrného faktoru  $X_{i\_ref}$  a poruchového referenčního bezrozměrného faktoru  $X_{i\_err}$ .

Navržená metoda je schopna vyhodnotit i typ poruchy daný zkratem nebo rozpojením jedné nebo 40  
více výkonových polovodičových součástek rotačního usměřovače 4. Typ poruchy je vyhodnocen z velikosti efektivní hodnoty 19 svorkového napětí 9 synchronního stroje 1 a z porovnání bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy (z bloku 13 výpočtu faktoru poruchy) s předem vypočtenými nebo experimentálně určenými hodnotami pro jednotlivé typy poruch rotačního 45  
usměřovače 4, které jsou uloženy v řídicím počítači 8 (typicky v regulátoru buzení). Algoritmus detekování poruchy polovodičových součástek rotačního usměřovače 4 a zdroje 2 buzení je patrný z blokového schéma na obr. 2. Základním diagnostickým signálem, jak popsáno výše, je fázový budicí proud 3.

Pro určení polovodičových součástek, u nichž došlo u rotačního usměřovače 4 k poruše, je 50  
nutné stanovit jeho elektrický úhel. Ten lze vyhodnotit z matematického modelu asynchronního stroje, který popisuje chování zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou. Pro nalezení elektrického úhlu rotačního usměřovače 4 je možné použít napěťový nebo proudový model asynchronního motoru, do nichž vstupují prostorový vektor střídavého napájecího napětí 11, prostorový vektor 55  
budicího proudu vypočítaný ze změřených fázových budicích proudů 3, poloha nebo otáčivá

rychlost rotoru synchronního stroje 1 vynásobená počtem pólů 17 zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou a parametry náhradního schématu zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou. Prostorový vektor rotorového napětí je vypočítán jako součet derivace prostorového vektoru rotorového toku zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou a úbytku napětí na rotorovém odporu. 5  
Příčemž úbytek na rotorovém odporu lze obvykle zanedbat. Rovnice pro výpočet napětí rotoru musí být vypočítána v souřadném systému rotoru. Elektrický úhel rotačního usměřovače 4 je pak roven poloze vypočteného vektoru rotorového napětí v souřadném systému rotoru.

Zjednodušeně lze elektrický úhel rotačního usměřovače 4 určit pomocí polohy rotoru zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou a polohy vektoru střídavého napájecího napětí 11 ve stojícím souřadném systému. Algoritmus zde vychází z předpokladu, že rotor zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou se otáčí opačným směrem než vektor střídavého napájecího napětí 11. 10

Polohu rotoru zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou lze získat například z informace o úhlu 10 natočení rotoru synchronního stroje 1 určeného z mechanického čidla. 15

Ve všech výše uvedených výpočtech jsou prostorové vektory veličin typicky stanovovány prostřednictvím Clarkové transformace 18. Vyhodnocování elektrického úhlu rotačního usměřovače 4 může být prováděno průběžně po celou dobu provozu nebo jednorázově po detekci poruchy. Na základě takto stanoveného elektrického úhlu diagnostikovaného rotačního usměřovače 4 lze vyhodnotit takt vedení součástek (viz blok 16), při nichž dochází k anomálnímu tvaru (viz blok 15) v časovém průběhu měřeného fázového budicího proudu 3 vstupujícího do zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou. 20

## PATENTOVÉ NÁROKY

1. Způsob detekce poruchy rotačního usměřovače (4) bezkroužkových synchronních strojů (6) s rotačními budíči asynchronního typu, kde rotační usměřovač (4) propojuje rotorové budíči  
 5 vinutí synchronního stroje (1) se zařízením (5) s rotační magnetickou vazbou, které je připojeno na střídavý zdroj buzení (7), **vyznačující se tím**, že na výstupní straně střídavého zdroje buzení (7), která je připojena k zařízení (5) s rotační magnetickou vazbou, se měří fázový budicí proud (3), dále se frekvenční analýzou (12) ze změřeného fázového budicího proudu (3) vyhodnotí
- amplituda základní harmonické, jejíž frekvence je rovna frekvenci napájecí sítě, k níž je  
 10 bezkroužkový synchronní stroj (6) přifázován, a
- amplitudy všech nenulových celistvých násobků základní harmonické frekvence až do součtu hodnoty frekvence napájecí sítě a hodnoty dané součinem frekvence střídavého napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměřovače (4) a jeho pulznosti  $p$ ,
- dále se podílem vypočte bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy, kde
- 15 čítec je součet hodnot amplitud vyhodnocených frekvenčních složek měřeného fázového budicího proudu (3) zdroje (2) buzení majících frekvenci vyšší, než je frekvence základní harmonické, avšak s vyloučením dvou frekvenčních složek o frekvencích stanovených tak, že
- hodnota frekvence první vyloučené frekvenční složky je rovna součinu frekvence střídavého  
 20 napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměřovače (4) a jeho pulznosti  $p$  zvýšeného o hodnotu frekvence napájecí sítě, k níž je bezkroužkový synchronní stroj (6) přifázován a
- hodnota frekvence druhé vyloučené frekvenční složky je rovna součinu frekvence střídavého napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměřovače (4) a jeho pulznosti  $p$  sníženého o hodnotu frekvence napájecí sítě, k níž je bezkroužkový synchronní stroj (6) přifázován
- a jmenovatel je součet hodnot amplitud řečených dvou vyloučených frekvenčních složek fázového  
 25 budicího proudu (3) vstupujícího do statoru zařízení (5) s rotační magnetickou vazbou,
- v bezporuchovém stavu se vypočte bezporuchový referenční bezrozměrný faktor  $X_{i\_ref}$ , dále se provede elektrické odpojení alespoň jedné výkonové polovodičové součástky rotačního usměřovače (4), a vyhodnotí se poruchový referenční bezrozměrný faktor  $X_{i\_err}$ ,
- 30 aritmetickým průměrem hodnot bezporuchového referenčního bezrozměrného faktoru  $X_{i\_ref}$  a poruchového referenčního bezrozměrného faktoru  $X_{i\_err}$  se určí bezrozměrná mez  $X_{i\_threshold}$  detekce poruchy,
- a při provozu rotačního usměřovače (4) se kontinuálně vypočítává bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy, přičemž porucha zdroje (2) buzení se signalizuje v případě, že po dokončení procedury nabuzení synchronního stroje (1) indikovaném signálem (21)
- 35 – je bezrozměrný faktor  $X_i$  poruchy větší než bezrozměrná mez  $X_{i\_threshold}$  detekce poruchy po dobu delší než jedna perioda základní harmonické frekvence, a/nebo
- je efektivní hodnota změřeného fázového budicího proudu (3) mimo povolený provozní rozsah, a/nebo
- 40 – je efektivní hodnota indukovaného napětí synchronního stroje (1) při fázovém budicím proudu (3), jehož velikost efektivní hodnoty se nachází v povoleném provozním rozsahu definovaném pro daný synchronní stroj (1), menší než efektivní hodnota indukovaného napětí synchronního stroje

(1) určená pro minimální povolenou provozní efektivní hodnotu fázového budicího proudu (3), přičemž indukované napětí synchronního stroje (1) je určeno z měřeného svorkového napětí (9).

2. Způsob podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že se dále určí typ poruchy zdroje (2) buzení způsobený zkratem nebo rozpojením jedné nebo více výkonových polovodičových součástek rotačního usměrňovače (4) tak, že se při velikosti efektivní hodnoty fázového budicího proudu (3) a efektivní hodnotě indukovaného napětí synchronního stroje (1) v povolených provozních mezích provede porovnání kontinuálně vyhodnocovaného bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy s jeho předem vypočtenými nebo experimentálně určenými hodnotami, jež jsou pro jednotlivé typy poruch rotačního usměrňovače (4) uloženy v řídicím počítači (8).

3. Způsob podle kteréhokoliv z předešlých nároků 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že se ve výpočtu (13) bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy v součtu v čitateli vynechá alespoň jedna harmonická frekvence.

4. Způsob podle kteréhokoliv z předešlých nároků 1 až 3, **vyznačující se tím**, že do dynamického matematického modelu zařízení (5) s rotační magnetickou vazbou se dosadí parametry náhradního schématu zařízení (5) s rotační magnetickou vazbou, prostorový vektor budicího proudu vypočtený ze změřených fázových budicích proudů (3) pomocí Clarkové transformace (18) a změřená poloha nebo rychlost rotoru synchronního stroje (1), která je vynásobena počtem pólpárů (17) zařízení (5) s rotační magnetickou vazbou, čímž je vypočtena elektrická poloha nebo elektrická rychlost rotoru zařízení (5) s rotační magnetickou vazbou,

matematickým modelem se vypočítá prostorový vektor rotorového napětí v souřadném systému rotoru jako součet časové derivace prostorového vektoru rotorového toku zařízení (5) s rotační magnetickou vazbou a úbytku napětí na rotorovém odporu, elektrický úhel rotačního usměrňovače (4) je pak roven poloze vypočteného prostorového vektoru rotorového napětí v souřadném systému rotoru,

přičemž z hodnoty elektrického úhlu rotačního usměrňovače (4) odečtené v okamžiku, kdy došlo u fázového budicího proudu (3) vůči bezporuchovému stavu k anomálii ve tvaru jeho měřeného průběhu, se určí fáze a/nebo konkrétní polovodičová součástka rotačního usměrňovače (4), u které došlo k poruše.

## 2 výkresy

Seznam vztahových značek:

- 1 synchronní stroj
- 2 zdroj buzení
- 3 fázový budicí proud měřený na výstupu střídavého zdroje buzení 7, tj. fázové proudy, které vstupují do statoru zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou
- 4 rotační usměrňovač
- 5 zařízení s rotační magnetickou vazbou (typicky rotační budič asynchronního typu nacházející se na společné hřídeli se synchronním strojem 1)
- 6 bezkroužkový synchronní stroj s rotačním budičem asynchronního typu
- 7 střídavý zdroj buzení s proměnou velikostí amplitudy první harmonické svorkového napětí (typicky se jedná buď o třífázový nepřímý frekvenční měnič s napětiovým střídačem, nebo o třífázový plně řízený střídavý měnič napětí), jenž napájí zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou
- 8 řídicí počítač, typicky regulátor buzení, v němž jsou implementovány algoritmy pro diagnostikování poruch rotačního usměrňovače 4
- 9 svorkové napětí synchronního stroje 1
- 10 úhel natočení rotoru synchronního stroje 1 určený z mechanického čidla
- 11 střídavé napájecí napětí zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou

12 blok výpočtu amplitudy základní harmonické (FFT), jejíž frekvence je rovna frekvenci napájecí sítě, k níž je bezkroužkový synchronní stroj 6 přifázován, a amplitudy všech nenulových celistvých násobků základní harmonické frekvence až do harmonické rovnající se součtu hodnoty frekvence napájecí sítě a hodnoty dané součinem frekvence střídavého napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměrňovače 4 a jeho pulznosti  $p$

13 blok výpočtu bezrozměrného faktoru  $X_i$  poruchy, který je vypočten podílem, kdy čitatel je součet hodnot amplitud vyhodnocených frekvenčních složek měřeného fázového budicího proudu 3 zdroje 2 buzení majících frekvenci vyšší, než je frekvence základní harmonické, avšak s vyloučením dvou frekvenčních složek. Hodnota frekvence první vyloučené frekvenční složky je rovna součinu frekvence střídavého napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměrňovače 4 a jeho pulznosti  $p$  povýšeného o hodnotu frekvence napájecí sítě, k níž je bezkroužkový synchronní stroj 6 přifázován. Hodnota frekvence druhé vyloučené frekvenční složky je rovna součinu frekvence střídavého napájecího napětí diagnostikovaného rotačního usměrňovače 4 a jeho pulznosti  $p$  poníženého o hodnotu frekvence napájecí sítě, k níž je bezkroužkový synchronní stroj 6 přifázován. Jmenovatel je součet hodnot amplitud řečených dvou vyloučených frekvenčních složek fázového budicího proudu 3 vstupujícího do statoru zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou

14 bezrozměrná mez  $X_{i\_threshold}$  detekce poruchy, která je stanovena jako aritmetický průměr bezporuchového referenčního bezrozměrného faktoru  $X_{i\_ref}$  vyhodnoceného v bezporuchovém stavu diagnostikovaného rotačního usměrňovače 4 a poruchového referenčního bezrozměrného faktoru  $X_{i\_err}$  při uměle vyvolané poruše, kdy v rotačním usměrňovači 4 nevede jedna výkonová polovodičová součástka

15 blok detekující anomálie v časovém průběhu měřeného fázového budicího proudu 3 vstupujícího do statoru zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou

16 blok vyhodnocující takt, v němž by v bezporuchovém stavu byla v činnosti vadná polovodičová součástka rotačního usměrňovače 4, na základě stanovené velikosti elektrického úhlu diagnostikovaného rotačního usměrňovače 4, při němž dochází k anomální deformaci v časovém průběhu měřeného fázového budicího proudu 3 vstupujícího do statoru zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou

17 počet pólpárů  $pp$  zařízení 5 s rotační magnetickou vazbou

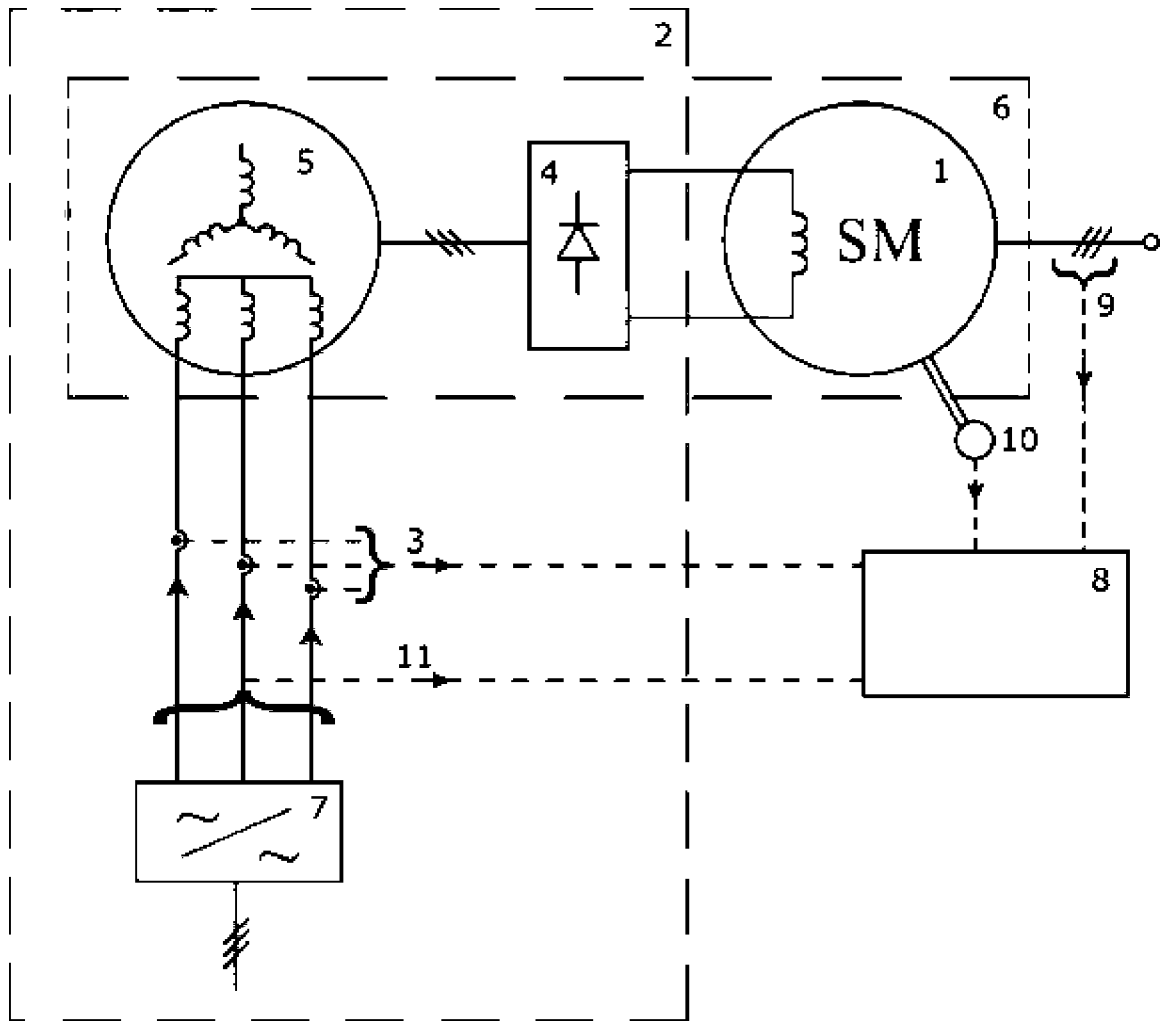
18 transformace na prostorový vektor (typicky využívající Clarkové transformaci)

19 výpočet efektivní hodnoty z časového průběhu měřené veličiny

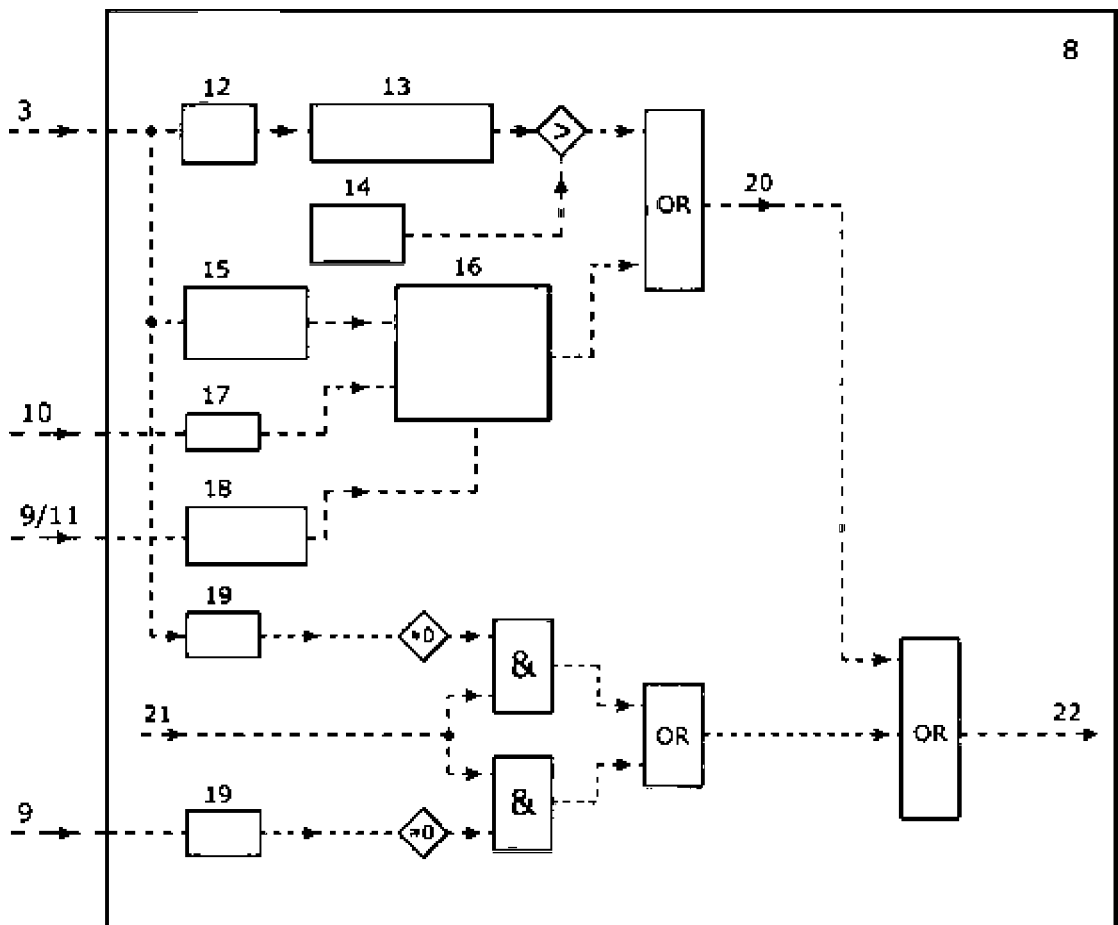
20 signál poruchy rotačního usměrňovače 4

21 signál dokončení nabuzovací procedury, režim provozu synchronního stroje 1

22 signál poruchy zdroje 2 buzení



Obr. 1



Obr. 2