

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5523265号

(P5523265)

(45) 発行日 平成26年6月18日(2014.6.18)

(24) 登録日 平成26年4月18日(2014.4.18)

(51) Int.Cl.

F I

G 0 6 F 17/50 (2006.01)

G 0 6 F 17/50 6 1 2 H

G 0 6 F 19/00 (2011.01)

G 0 6 F 19/00 1 1 O

請求項の数 4 (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2010-214677 (P2010-214677)
 (22) 出願日 平成22年9月27日 (2010.9.27)
 (65) 公開番号 特開2012-69024 (P2012-69024A)
 (43) 公開日 平成24年4月5日 (2012.4.5)
 審査請求日 平成24年8月28日 (2012.8.28)

(73) 特許権者 000005108
 株式会社日立製作所
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
 (74) 代理人 110000350
 ポレール特許業務法人
 (72) 発明者 宮田 健治
 茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株
 式会社日立製作所 日立研究所内
 審査官 松浦 功

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高速定常場解析方法、高速定常場解析装置、定常場高速解析プログラム、およびこのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

時間項を含む微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析により、式(1)で表される解析対象の物理量 $x(\quad)$ を解析手段によって算出する第1解析を行い、時間平均幅を基本波成分の位相幅に変換した値の半分を \quad 、 n^2 をN、 m^2 をM、および k^2 をKとし、前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であってn次の1個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 $y(\quad)$ を下記の式(2)、およびn次の1個の時間高調波を考慮する場合における $y_1(\quad)$ を下記の式(4)、 $y_n(\quad)$ を下記の式(5)、 g_1 を下記の式(6)および g_n を下記の式(7)とし、前記式(4)および前記式(5)における $y^{(2)}(\quad)$ を前記式(2)の2階微分、および前記式(4)および前記式(5)における $y^{(4)}(\quad)$ を前記式(2)の4階微分とし、前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であってn次およびm次の2個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 $y(\quad)$ を下記の式(8)、およびn次およびm次の2個の時間高調波を考慮する場合における $y_1(\quad)$ を下記の式(10)、 $y_n(\quad)$ を下記の式(11)、 $y_m(\quad)$ を下記の式(12)および g_m を下記の式(13)とし、前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(2)}(\quad)$ を前記式(8)の2階微分、前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(4)}(\quad)$ を前記式(8)の4階微分および前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(6)}(\quad)$ を前記式(8)の6階微分とし、および前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であってn次、m次およびk次の3個の時間高調波を考

10

20

慮する場合における前記時間平均量 y () を下記の式 (1 4)、および n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合における y_1 () を下記の式 (1 6)、 y_n () を下記の式 (1 7)、 y_m () を下記の式 (1 8)、 y_k () を下記の式 (1 9) および g_k を下記の式 (2 0) とし、前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8) および前記式 (1 9) における $y^{(2)}$ () を前記式 (1 4) の 2 階微分、前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8) および前記式 (1 9) における $y^{(4)}$ () を前記式 (1 4) の 4 階微分、前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8) および前記式 (1 9) における $y^{(6)}$ () を前記式 (1 4) の 6 階微分および前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8) および前記式 (1 9) における $y^{(8)}$ () を前記式 (1 4) の 8 階微分としたとき、算出された前記物理量 x () を、 n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (4)、前記式 (5)、前記式 (6) および前記式 (7) を代入した下記の式 (3)、 n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (1 0)、前記式 (1 1)、前記式 (1 2)、前記式 (6)、前記式 (7) および前記式 (1 3) を代入した下記の式 (9)、および n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8)、前記式 (1 9)、前記式 (6)、前記式 (7)、前記式 (1 3) および前記式 (2 0) を代入した下記の式 (1 5) のうち選択された、補正後の物理量 x^{new} を示す前記式 (3)、前記式 (9) および前記式 (1 5) のいずれかを用いて、第 1 補正手段において補正し、

10

前記物理量の補正後に、時間項を含む前記微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析により前記解析対象の定常後の物理量を前記解析手段によって算出する第 2 解析を行うことを特徴とする高速定常場解析方法。

20

【数 1】

$$x(\theta) = a_0 e^{-\gamma\theta} + \sum_{k=1}^p x_{n_k}(\theta) + \sum_{l \neq k} x_l(\theta) \quad \dots (1)$$

【数 2】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) \quad \dots (2)$$

【数 3】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) \quad \dots (3)$$

30

【数 4】

$$y_1(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N-1} \quad \dots (4)$$

【数 5】

$$y_n(\theta) = \frac{y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N(N-1)} \quad \dots (5)$$

【数 6】

$$g_1 = \frac{\phi}{\sin \phi} \quad \dots (6)$$

40

【数 7】

$$g_n = \frac{n\phi}{\sin n\phi} \quad \dots (7)$$

【数 8】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) \quad \dots (8)$$

50

【数 9】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) \quad \dots (9)$$

【数 10】

$$y_1(\theta) = -\frac{NM y^{(2)}(\theta) + (N+M) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{(N-1)(M-1)} \quad \dots (10)$$

【数 11】

$$y_n(\theta) = -\frac{M y^{(2)}(\theta) + (M+1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)} \quad \dots (11)$$

10

【数 12】

$$y_m(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + (N+1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{M(M-1)(M-N)} \quad \dots (12)$$

【数 13】

$$g_m = \frac{m \phi}{\sin m \phi} \quad \dots (13)$$

【数 14】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma \theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) + y_k(\theta) \quad \dots (14)$$

20

【数 15】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) + g_k y_k(\theta) \quad \dots (15)$$

【数 16】

$$y_1(\theta) = -\frac{NMK y^{(2)}(\theta) + (NM + MK + KN) y^{(4)}(\theta) + (N + M + K) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{(N-1)(M-1)(K-1)} \quad \dots (16)$$

【数 17】

$$y_n(\theta) = \frac{MK y^{(2)}(\theta) + (MK + M + K) y^{(4)}(\theta) + (M + K + 1) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)(N-K)} \quad \dots (17)$$

30

【数 18】

$$y_m(\theta) = \frac{KN y^{(2)}(\theta) + (KN + K + N) y^{(4)}(\theta) + (K + N + 1) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{M(M-1)(M-K)(M-N)} \quad \dots (18)$$

【数 19】

$$y_k(\theta) = \frac{NM y^{(2)}(\theta) + (NM + N + M) y^{(4)}(\theta) + (N + M + 1) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{K(K-1)(K-N)(K-M)} \quad \dots (19)$$

40

【数 20】

$$g_k = \frac{k \phi}{\sin k \phi} \quad \dots (20)$$

【請求項 2】

時間項を含む微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析により、式(1)で表される解析対象の物理量 $x(\quad)$ を算出する第1解析を行う解析手段と、

時間平均幅を基本波成分の位相幅に変換した値の半分を \quad 、 n^2 をN、 m^2 をM、および k^2 をKとし、前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であってn次

50

の 1 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 y () を下記の式 (2) 、および n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合における y_1 () を下記の式 (4) 、 y_n () を下記の式 (5) 、 g_1 を下記の式 (6) および g_n を下記の式 (7) とし、前記式 (4) および前記式 (5) における $y^{(2)}$ () を前記式 (2) の 2 階微分、および前記式 (4) および前記式 (5) における $y^{(4)}$ () を前記式 (2) の 4 階微分とし、前記時間平均幅内の物理量 x () の時間平均量 y () であって n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 y () を下記の式 (8) 、および n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合における y_1 () を下記の式 (10) 、 y_n () を下記の式 (11) 、 y_m () を下記の式 (12) および g_m を下記の式 (13) とし、前記式 (10) 、前記式 (11) および前記式 (12) における $y^{(2)}$ () を前記式 (8) の 2 階微分、前記式 (10) 、前記式 (11) および前記式 (12) における $y^{(4)}$ () を前記式 (8) の 4 階微分および前記式 (10) 、前記式 (11) および前記式 (12) における $y^{(6)}$ () を前記式 (8) の 6 階微分とし、および前記時間平均幅内の物理量 x () の時間平均量 y () であって n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 y () を下記の式 (14) 、および n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合における y_1 () を下記の式 (16) 、 y_n () を下記の式 (17) 、 y_m () を下記の式 (18) 、 y_k () を下記の式 (19) および g_k を下記の式 (20) とし、前記式 (16) 、前記式 (17) 、前記式 (18) および前記式 (19) における $y^{(2)}$ () を前記式 (14) の 2 階微分、前記式 (16) 、前記式 (17) 、前記式 (18) および前記式 (19) における $y^{(4)}$ () を前記式 (14) の 4 階微分、前記式 (16) 、前記式 (17) 、前記式 (18) および前記式 (19) における $y^{(6)}$ () を前記式 (14) の 6 階微分および前記式 (16) 、前記式 (17) 、前記式 (18) および前記式 (19) における $y^{(8)}$ () を前記式 (14) の 8 階微分としたとき、算出された前記物理量 x () を、 n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (4) 、前記式 (5) 、前記式 (6) および前記式 (7) を代入した下記の式 (3) 、 n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (10) 、前記式 (11) 、前記式 (12) 、前記式 (6) 、前記式 (7) および前記式 (13) を代入した下記の式 (9) 、および n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (16) 、前記式 (17) 、前記式 (18) 、前記式 (19) 、前記式 (6) 、前記式 (7) 、前記式 (13) および前記式 (20) を代入した下記の式 (15) のうち選択された、補正後の物理量 x^{new} を示す前記式 (3) 、前記式 (9) および前記式 (15) のいずれかをを用いて補正する第 1 補正手段と、

前記物理量の補正後に、時間項を含む前記微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析により前記解析対象の定常後の物理量を算出する第 2 解析を行う前記解析手段とを備えたことを特徴とする高速定常場解析装置。

【数 2 1】

$$x(\theta) = a_0 e^{-j\theta} + \sum_{k=1}^P x_{n_k}(\theta) + \sum_{l \neq k} x_l(\theta) \quad \dots (1)$$

【数 2 2】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-j\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) \quad \dots (2)$$

【数 2 3】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) \quad \dots (3)$$

【数 2 4】

$$y_1(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N - 1} \quad \dots (4)$$

10

20

30

40

【数 2 5】

$$y_n(\theta) = \frac{y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N(N-1)} \quad \dots (5)$$

【数 2 6】

$$g_1 = \frac{\phi}{\sin \phi} \quad \dots (6)$$

【数 2 7】

$$g_n = \frac{n \phi}{\sin n \phi} \quad \dots (7)$$

10

【数 2 8】

$$y(\theta) = \alpha'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) \quad \dots (8)$$

【数 2 9】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) \quad \dots (9)$$

【数 3 0】

20

$$y_1(\theta) = -\frac{NM y^{(2)}(\theta) + (N+M) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{(N-1)(M-1)} \quad \dots (10)$$

【数 3 1】

$$y_n(\theta) = -\frac{M y^{(2)}(\theta) + (M+1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)} \quad \dots (11)$$

【数 3 2】

$$y_m(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + (N+1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{M(M-1)(M-N)} \quad \dots (12)$$

30

【数 3 3】

$$g_m = \frac{m \phi}{\sin m \phi} \quad \dots (13)$$

【数 3 4】

$$y(\theta) = \alpha'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) + y_k(\theta) \quad \dots (14)$$

【数 3 5】

40

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) + g_k y_k(\theta) \quad \dots (15)$$

【数 3 6】

$$y_1(\theta) = -\frac{NMK y^{(2)}(\theta) + (NM + MK + KN) y^{(4)}(\theta) + (N + M + K) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{(N-1)(M-1)(K-1)} \quad \dots (16)$$

【数 3 7】

$$y_n(\theta) = \frac{MK y^{(2)}(\theta) + (MK + M + K) y^{(4)}(\theta) + (M + K + 1) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)(N-K)} \quad \dots (17)$$

50

【数 3 8】

$$y_m(\theta) = \frac{KNy^{(2)}(\theta) + (KN + K + N)y^{(4)}(\theta) + (K + N + 1)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{M(M-1)(M-K)(M-N)} \quad \dots (18)$$

【数 3 9】

$$y_k(\theta) = \frac{NMy^{(2)}(\theta) + (NM + N + M)y^{(4)}(\theta) + (N + M + 1)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{K(K-1)(K-N)(K-M)} \quad \dots (19)$$

【数 4 0】

$$g_k = \frac{k\phi}{\sin k\phi} \quad \dots (20)$$

10

【請求項 3】

高速定常場解析を行うためにコンピュータを、

時間項を含む微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析により、式(1)で表される解析対象の物理量 $x(\quad)$ を算出する第 1 解析を行う解析手段、

時間平均幅を基本波成分の位相幅に変換した値の半分を ϕ 、 n^2 を N 、 m^2 を M 、および k^2 を K とし、前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であって n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 $y(\quad)$ を下記の式(2)、および n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合における $y_1(\quad)$ を下記の式(4)、 $y_n(\quad)$ を下記の式(5)、 g_1 を下記の式(6)および g_n を下記の式(7)とし、前記式(4)および前記式(5)における $y^{(2)}(\quad)$ を前記式(2)の 2 階微分、および前記式(4)および前記式(5)における $y^{(4)}(\quad)$ を前記式(2)の 4 階微分とし、前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であって n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 $y(\quad)$ を下記の式(8)、および n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合における $y_1(\quad)$ を下記の式(10)、 $y_n(\quad)$ を下記の式(11)、 $y_m(\quad)$ を下記の式(12)および g_m を下記の式(13)とし、前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(2)}(\quad)$ を前記式(8)の 2 階微分、前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(4)}$ (\quad) を前記式(8)の 4 階微分および前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(6)}$ (\quad) を前記式(8)の 6 階微分とし、および前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であって n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 $y(\quad)$ を下記の式(14)、および n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合における $y_1(\quad)$ を下記の式(16)、 $y_n(\quad)$ を下記の式(17)、 $y_m(\quad)$ を下記の式(18)、 $y_k(\quad)$ を下記の式(19)および g_k を下記の式(20)とし、前記式(16)、前記式(17)、前記式(18)および前記式(19)における $y^{(2)}(\quad)$ を前記式(14)の 2 階微分、前記式(16)、前記式(17)、前記式(18)および前記式(19)における $y^{(4)}$ (\quad) を前記式(14)の 4 階微分、前記式(16)、前記式(17)、前記式(18)および前記式(19)における $y^{(6)}$ (\quad) を前記式(14)の 6 階微分および前記式(16)、前記式(17)、前記式(18)および前記式(19)における $y^{(8)}$ (\quad) を前記式(14)の 8 階微分としたとき、算出された前記物理量 $x(\quad)$ を、 n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合には前記式(4)、前記式(5)、前記式(6)および前記式(7)を代入した下記の式(3)、 n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合には前記式(10)、前記式(11)、前記式(12)、前記式(6)、前記式(7)および前記式(13)を代入した下記の式(9)、および n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合には前記式(16)、前記式(17)、前記式(18)、前記式(19)、前記式(6)、前記式(7)、前記式(13)および前記式(20)を代入した下記の式(15)のうち選択された、補正後の物理量 x^{new} を示す前記式(3)、前記式(9)および前記式(15)のいずれかを用いて補正する第 1 補正手段、および

20

30

40

50

前記物理量の補正後に、時間項を含む前記微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる前記過渡解析により解析対象の定常後の物理量を算出する第2解析を行う前記解析手段、

として機能させるための定常場高速解析プログラム。

【数4 1】

$$x(\theta) = a_0 e^{-\gamma\theta} + \sum_{k=1}^p x_{n_k}(\theta) + \sum_{l \neq k} x_l(\theta) \quad \dots (1)$$

【数4 2】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) \quad \dots (2)$$

10

【数4 3】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) \quad \dots (3)$$

【数4 4】

$$y_1(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N-1} \quad \dots (4)$$

【数4 5】

$$y_n(\theta) = \frac{y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N(N-1)} \quad \dots (5)$$

20

【数4 6】

$$g_1 = \frac{\phi}{\sin \phi} \quad \dots (6)$$

【数4 7】

$$g_n = \frac{n \phi}{\sin n \phi} \quad \dots (7)$$

30

【数4 8】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) \quad \dots (8)$$

【数4 9】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) \quad \dots (9)$$

【数5 0】

$$y_1(\theta) = -\frac{N M y^{(2)}(\theta) + (N+M) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{(N-1)(M-1)} \quad \dots (10)$$

40

【数5 1】

$$y_n(\theta) = -\frac{M y^{(2)}(\theta) + (M+1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)} \quad \dots (11)$$

【数5 2】

$$y_m(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + (N+1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{M(M-1)(M-N)} \quad \dots (12)$$

50

【数 5 3】

$$g_m = \frac{m \phi}{\sin m \phi} \quad \dots (13)$$

【数 5 4】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma \theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) + y_k(\theta) \quad \dots (14)$$

【数 5 5】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) + g_k y_k(\theta) \quad \dots (15)$$

10

【数 5 6】

$$y_1(\theta) = -\frac{NMKy^{(2)}(\theta) + (NM + MK + KN)y^{(4)}(\theta) + (N + M + K)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{(N-1)(M-1)(K-1)} \quad \dots (16)$$

【数 5 7】

$$y_n(\theta) = \frac{MKy^{(2)}(\theta) + (MK + M + K)y^{(4)}(\theta) + (M + K + 1)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)(N-K)} \quad \dots (17)$$

【数 5 8】

$$y_m(\theta) = \frac{KNy^{(2)}(\theta) + (KN + K + N)y^{(4)}(\theta) + (K + N + 1)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{M(M-1)(M-K)(M-N)} \quad \dots (18)$$

20

【数 5 9】

$$y_k(\theta) = \frac{NMy^{(2)}(\theta) + (NM + N + M)y^{(4)}(\theta) + (N + M + 1)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{K(K-1)(K-N)(K-M)} \quad \dots (19)$$

【数 6 0】

$$g_k = \frac{k \phi}{\sin k \phi} \quad \dots (20)$$

30

【請求項 4】

高速定常場解析を行うためにコンピュータを、

時間項を含む微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析により、式(1)で表される解析対象の物理量 $x(\quad)$ を算出する第 1 解析を行う解析手段、

時間平均幅を基本波成分の位相幅に変換した値の半分を ϕ 、 n^2 を N 、 m^2 を M 、および k^2 を K とし、前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であって n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 $y(\quad)$ を下記の式(2)、および n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合における $y_1(\quad)$ を下記の式(4)、 $y_n(\quad)$ を下記の式(5)、 g_1 を下記の式(6)および g_n を下記の式(7)とし、前記式(4)および前記式(5)における $y^{(2)}(\quad)$ を前記式(2)の 2 階微分、および前記式(4)および前記式(5)における $y^{(4)}(\quad)$ を前記式(2)の 4 階微分とし、前記時間平均幅内の物理量 $x(\quad)$ の時間平均量 $y(\quad)$ であって n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 $y(\quad)$ を下記の式(8)、および n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合における $y_1(\quad)$ を下記の式(10)、 $y_n(\quad)$ を下記の式(11)、 $y_m(\quad)$ を下記の式(12)および g_m を下記の式(13)とし、前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(2)}(\quad)$ を前記式(8)の 2 階微分、前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(4)}(\quad)$ を前記式(8)の 4 階微分および前記式(10)、前記式(11)および前記式(12)における $y^{(6)}(\quad)$ を前記式(8)の 6 階微分とし、および前記時間平均幅内

40

50

の物理量 x () の時間平均量 y () であって n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合における前記時間平均量 y () を下記の式 (1 4)、および n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合における y_1 () を下記の式 (1 6)、 y_n () を下記の式 (1 7)、 y_m () を下記の式 (1 8)、 y_k () を下記の式 (1 9) および g_k を下記の式 (2 0) とし、前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8) および前記式 (1 9) における $y^{(2)}$ () を前記式 (1 4) の 2 階微分、前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8) および前記式 (1 9) における $y^{(4)}$ () を前記式 (1 4) の 4 階微分、前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8) および前記式 (1 9) における $y^{(6)}$ () を前記式 (1 4) の 6 階微分および前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8) および前記式 (1 9) における $y^{(8)}$ () を前記式 (1 4) の 8 階微分としたとき、算出された前記物理量 x () を、 n 次の 1 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (4)、前記式 (5)、前記式 (6) および前記式 (7) を代入した下記の式 (3)、 n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (1 0)、前記式 (1 1)、前記式 (1 2)、前記式 (6)、前記式 (7) および前記式 (1 3) を代入した下記の式 (9)、および n 次、 m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮する場合には前記式 (1 6)、前記式 (1 7)、前記式 (1 8)、前記式 (1 9)、前記式 (6)、前記式 (7)、前記式 (1 3) および前記式 (2 0) を代入した下記の式 (1 5) のうち選択された、補正後の物理量 x^{new} を示す前記式 (3)、前記式 (9) および前記式 (1 5) のいずれかを用いて補正する第 1 補正手段、および

10

前記物理量の補正後に、時間項を含む前記微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析により前記解析対象の定常後の物理量を算出する第 2 解析を行う前記解析手段、
として機能させるための定常場高速解析プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

20

【数 6 1】

$$x(\theta) = a_0 e^{-\gamma\theta} + \sum_{k=1}^p x_{n_k}(\theta) + \sum_{l \neq k} x_l(\theta) \quad \dots (1)$$

【数 6 2】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) \quad \dots (2)$$

30

【数 6 3】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) \quad \dots (3)$$

【数 6 4】

$$y_1(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N-1} \quad \dots (4)$$

【数 6 5】

$$y_n(\theta) = \frac{y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N(N-1)} \quad \dots (5)$$

40

【数 6 6】

$$g_1 = \frac{\phi}{\sin \phi} \quad \dots (6)$$

【数 6 7】

$$g_n = \frac{n\phi}{\sin n\phi} \quad \dots (7)$$

【数 6 8】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) \quad \dots (8)$$

【数 6 9】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) \quad \dots (9)$$

10

【数 7 0】

$$y_1(\theta) = -\frac{NM y^{(2)}(\theta) + (N+M) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{(N-1)(M-1)} \quad \dots (10)$$

【数 7 1】

$$y_n(\theta) = -\frac{M y^{(2)}(\theta) + (M+1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)} \quad \dots (11)$$

【数 7 2】

$$y_m(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + (N+1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{M(M-1)(M-N)} \quad \dots (12)$$

20

【数 7 3】

$$g_m = \frac{m\phi}{\sin m\phi} \quad \dots (13)$$

【数 7 4】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) + y_k(\theta) \quad \dots (14)$$

30

【数 7 5】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) + g_k y_k(\theta) \quad \dots (15)$$

【数 7 6】

$$y_1(\theta) = -\frac{NMK y^{(2)}(\theta) + (NM + MK + KN) y^{(4)}(\theta) + (N + M + K) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{(N-1)(M-1)(K-1)} \quad \dots (16)$$

【数 7 7】

$$y_n(\theta) = \frac{MK y^{(2)}(\theta) + (MK + M + K) y^{(4)}(\theta) + (M + K + 1) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)(N-K)} \quad \dots (17)$$

40

【数 7 8】

$$y_m(\theta) = \frac{KN y^{(2)}(\theta) + (KN + K + N) y^{(4)}(\theta) + (K + N + 1) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{M(M-1)(M-K)(M-N)} \quad \dots (18)$$

【数 7 9】

$$y_k(\theta) = \frac{NM y^{(2)}(\theta) + (NM + N + M) y^{(4)}(\theta) + (N + M + 1) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{K(K-1)(K-N)(K-M)} \quad \dots (19)$$

【数 8 0】

$$g_k = \frac{k \phi}{\sin k \phi} \quad \dots (20)$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、高速定常場解析方法、高速定常場解析装置、定常場高速解析プログラム、およびこのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体に関する。

【背景技術】

10

【0002】

従来の代表的な非線形磁場解析法として、有限要素法による解析法が知られている。また、非線形磁場解析法として、ICCG法（不完全コレスキー分解前処理付き共役勾配法）による反復解法や透磁率を逐次修正するニュートン・ラフソン法を併用している方法もある。この方法は、例えば、「電気工学の有限要素法」中田高義・高橋則雄著、森北出版、pp. 195 - 208、1986年に記載されている。

【0003】

時間微分項をもつ過渡現象を取り扱う微分方程式を過渡解析して解を求める場合、時間減衰項の時定数が長い場合、目的の定常場を求めるのに、多くの時間ステップによる過渡解析を必要とする。この問題を解決するために、TP-EEC法、多相交流TP-EEC法、ならびにTDC法が開発された。TP-EEC法は、「2次元電磁界解析の有効利用に残された課題（その3）」徳増正・藤田真史・上田隆司、電気学会静止器・回転機合同研究会資料、SA-08-62/RM-08-69、pp. 77-82、2008年および「時間周期有限要素法とEEC法に基づく非線形過渡電磁場解析における時間積分の収束性改善」高橋康人、徳増正、藤田真史、若尾真治、岩下武史、金沢正憲、電気学会論文誌B、Vol. 129(2009)No. 6、pp. 791-798に記載されている。多相交流TP-EEC法は「2次元電磁界解析の有効利用に残された課題（その4）」徳増正・藤田真史・上田隆司、電気学会静止器・回転機合同研究会資料、SA-09-6/RM-09-6、pp. 29-34、2009年に記載され、TDC法は「時間周期非線形場の高速求解法」宮田健治、電気学会マグネティックス・静止器・回転機合同研究会資料、MAG-10-8/SA-10-8/RM-10-8、pp. 43-48、2010年に記載されている。

20

30

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】「電気工学の有限要素法」中田高義・高橋則雄著、森北出版、pp. 195 - 208、1986年

【非特許文献2】「2次元電磁界解析の有効利用に残された課題（その3）」徳増正・藤田真史・上田隆司、電気学会静止器・回転機合同研究会資料、SA-08-62/RM-08-69、pp. 77-82、2008年

40

【非特許文献3】「時間周期有限要素法とEEC法に基づく非線形過渡電磁場解析における時間積分の収束性改善」高橋康人、徳増正、藤田真史、若尾真治、岩下武史、金沢正憲、電気学会論文誌B、Vol. 129(2009)No. 6、pp. 791-798

【非特許文献4】「2次元電磁界解析の有効利用に残された課題（その4）」徳増正・藤田真史・上田隆司、電気学会静止器・回転機合同研究会資料、SA-09-6/RM-09-6、pp. 29-34、2009年

【非特許文献5】「時間周期非線形場の高速求解法」宮田健治、電気学会マグネティックス・静止器・回転機合同研究会資料、MAG-10-8/SA-10-8/RM-10-8、pp. 43-48、2010年

【発明の概要】

50

【発明が解決しようとする課題】**【0005】**

TP-EEC法は、時間に関する周期性を直接利用しており、基本的には半周期あるいは一周期の間の過渡解析を実施しないと、解析対象の物理量を補正することができない。この補正は3回程度で完了するものの、補正完了までに、半周期境界条件を満たす場合は1.5周期程度、一周期境界条件を満たす場合は3周期程度の計算を必要とする。また、1回の補正計算において、行列方程式を解く必要があり、補正のためにかかる計算時間が比較的長くなるという課題がある。さらに、補正に1.5周期または3周期程度の計算が必要なため、基本周波数成分の周期が非常に長い場合には、補正のために長い計算時間が必要であることは勿論のこと、その間に減衰場がある程度減衰して、本来のTP-EEC法による定常場を高速に求めるという効果が弱められるという課題がある。また、TDC法では、時間高調波が補正の障害になるために、多くの時間高調波が存在する場合には補正能力が低下する課題がある。

10

【0006】

本発明の目的は、時間微分項を含む現象の過渡解析において、解析対象の定常状態における物理量をより短時間に且つ精度良く求めることができる高速定常場解析方法、高速定常場解析装置、定常場高速解析プログラム、およびこのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体を提供することにある。

【課題を解決するための手段】**【0007】**

20

上記した目的を達成する本発明の特徴は、時間項を含む微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析により解析対象の物理量を解析手段によって算出する第1解析を行い、算出された物理量を、第1補正手段において時間高調波次数を用いて補正し、その物理量の補正後に、時間項を含むその微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過渡解析によりその解析対象の定常後の物理量をその解析手段によって算出する第2解析を行うことにある。

【0008】

解析対象の物理量の時間高調波を考慮して解析対象の過渡解析により得られた物理量を補正するので、時間微分項を含む現象の過渡解析において、解析対象の定常状態における物理量（定常解）をより短時間に且つ精度良く求めることができる。

30

【0009】

好ましくは、設定時間幅内に存在する、第1解析によって算出された複数の物理量を用いて、それらの物理量の時間平均量を、時間平均手段によって算出し、第1補正手段によるその物理量の補正が、時間平均量を反映した時間高調波次数を用いて行われることが望ましい。

【0010】

時間平均の物理量（算出された解析対象の物理量の時間平均量）を考慮して補正を行うので、補正において考慮していない時間高調波（サブ高調波）による補正への影響を低減することができ、得られた定常解の精度をさらに向上させることができる。

【発明の効果】

40

【0011】

本発明によれば、時間微分項を含む現象の過渡解析において、解析対象の定常状態における物理量をより短時間に且つ精度良く求めることができる。

【図面の簡単な説明】**【0012】**

【図1】本発明の好適な一実施例である実施例1の高速定常場解析方法の処理手順を示す説明図である。

【図2】図1に示す処理手順を実行する電子計算機の構成図である。

【図3】図1に示す処理手順を実行した場合の数値計算例におけるyの時間変化を示す説明図である。

50

【図４】図１に示す処理手順を実行した場合の数値計算例における理論解との誤差の時間変化を示す説明図である。

【図５】本発明の他の実施例である実施例２の高速定常場解析方法の処理手順を示す説明図である。

【図６】本発明の他の実施例である実施例３の高速定常場解析方法の処理手順を示す説明図である。

【図７】本発明の他の実施例である実施例５の高速定常場解析方法の処理手順を示す説明図である。

【発明を実施するための形態】

【００１３】

10

以下、本発明の高速定常場解析方法の実施例を詳述する。本発明の高速定常場解析方法の実施例では、複数のタイムステップにおける演算処理を行い、時間微分項を含む方程式に基づく過渡解析を行って解析対象の物理量が求められる。この高速定常場解析方法は、演算装置である電子計算機で実行され、解析結果は、記憶装置に記憶されると共に表示装置に表示される。

【実施例１】

【００１４】

本発明の好適な一実施例である実施例１の高速定常場解析方法を、図１を用いて以下に説明する。

【００１５】

20

本実施例の高速定常場解析方法が、図２に示す演算装置である電子計算機１を用いて実行される。電子計算機１は、図２に示すように、演算部２、表示装置６および入力装置（例えば、キーボードまたはマウス）７を有する。演算部２は、中央処理装置（以下、ＣＰＵという）３、記憶装置４および入力インタフェース５を有する。ＣＰＵ３が入力インタフェース５に接続され、記憶装置４がＣＰＵ３および入力インタフェース５に接続される。表示装置６および入力装置７が入力インタフェース５に接続される。図１に示す高速定常場解析方法の処理手順、解析対象の物理量の算出に用いられる時間微分項を含む微分方程式（例えば、電磁場解析を行う場合には、マックスウェルの方程式あるいはその変形式）、および解析プロセスをコントロールするためのコントロールデータが記憶装置４に予め記憶されている。コントロールデータは、補正に必要な補正回数および解析により算出された物理量の補正に用いる時間高調波次数を含んでおり、記憶装置４内のデータファイルに保存されている。図１に示す高速定常場解析方法の処理手順は、高速定常場解析方法のプログラムとしてプログラム化されて記憶装置４に記憶されている。記憶装置４はＣＰＵ３で読み取り可能な記録媒体である。

30

【００１６】

本実施例で用いられる高速定常場解析方法の処理手順は、データ入力プロセス１０、解析プロセス２０、解析結果を記憶するプロセス３１、および表示プロセス３２を有する。図１に示す処理手順を用いて、電子計算機１で実行される本実施例の高速定常場解析方法を具体的に説明する。

【００１７】

40

高速定常場解析方法を実行するために電子計算機１が立ち上がり、オペレータが入力装置７から解析対象の情報を入力したとき、ＣＰＵ３が、図１に示す処理手順を有するプログラム、およびその解析対象に用いる微分方程式を記憶装置４からＣＰＵ３の内部メモリに取り込む。ＣＰＵ３は、記憶装置３のデータファイルに記憶しているコントロールデータを読み出して表示装置６に表示する。オペレータは、表示装置６に表示されたコントロールデータのうち、今回の解析に必要な情報を選択する。ＣＰＵ３は選択されたコントロールデータを入力する（ステップ１２）。選択されたコントロールデータがＣＰＵ３の内部メモリに記憶される。具体的には、表示装置６に表示されたコントロールデータである補正回数、時間高調波次数、および時間平均幅（時間平均ステップ数）の各情報のうち補正回数の値、今回の解析に用いる時間高調波次数、および時間平均幅の値を、オペレータ

50

がマウスで選択することにより、選択された補正回数の値、時間高調波次数、および時間平均幅の値がCPU3の内部メモリに取り込まれる。

【0018】

さらに、オペレータが、入力装置7から微分方程式を数値的に解くための解析対象の離散化データ（メッシュデータ）を入力する。CPU3は、入出力インタフェース5を介して、微分方程式を数値的に解くための解析対象の離散化データ（メッシュデータ）を入力し（ステップ11）、CPU3の内部メモリに記憶する。コントロールデータも、オペレータがGUI（グラフィック・ユーザ・インタフェース）などによりCPU3に入力してもよい。

【0019】

データ入力プロセス10が終了した後、CPU3は解析プロセス20の各処理を実行する。解析プロセス20は補正プロセス25を含んでおり、補正プロセス25はステップ21～24の各処理を含んでいる。まず、微分方程式を離散化した解析実行モジュールによる過度解析により解析対象の物理量を算出する第1解析を行う（ステップ21）。微分方程式を離散化した解析実行モジュールが、ステップ11で入力した解析対象の離散化データ（メッシュデータ）を用いて作成され、この解析実行モジュールを用いた過度解析により解析対象の物理量が時間ステップ毎に算出される（第1解析の実行）。微分方程式を離散化した解析実行モジュールの作成、およびその過度解析は、従来の知られている方法で実行される。解析対象の物理量の算出が終了した後、解析結果を記憶装置に記憶する（ステップ22）。ステップ21で得られた解析対象の物理量が、時間ステップごとに記憶装置4に格納される。

【0020】

算出された解析対象の物理量の時間平均量を算出する（ステップ23）。記憶装置4に記憶された、ステップ12で入力した時間平均幅内に存在する算出された解析対象の物理量に基づいて、解析対象の物理量の時間平均量を算出する。解析対象の物理量の時間平均量を求めることによって、その物理量に含まれる時間高調波成分が平均化される。

【0021】

時間平均幅および時間高調波次数を用いて解析対象の物理量を補正する（ステップ24）。記憶装置4に記憶した時間ステップごとの、解析対象の物理量を、ステップ12で入力した、時間平均幅および時間高調波次数を用いて補正する。この時間平均幅および時間高調波次数を用いた補正式には、ステップ23で求められた解析対象の物理量の時間平均量が反映される。

【0022】

本実施例におけるステップ24での補正処理を説明する前に、時間高調波次数を用いた補正式について説明する。

【0023】

ステップ24では、ステップ21の解析により得られた、初期の非定常場での解析結果である解析対象の物理量から基本波および時間高調波を抽出し、初期の非定常場を基本波と時間高調波の和に置き換える補正を、算出された解析対象の物理量に対して実施する。このような補正が1回あるいは複数回実施される。

【0024】

初期の非定常場での解析結果である解析対象の物理量から基本波成分および時間高調波成分を抽出する方法として、半周期あるいは1周期の解析結果をフーリエ展開することにより、近似的な基本波成分および時間高調波成分を抽出する方法がある。あるいは、初期の非定常場での解析結果である解析対象の物理量から減衰成分を近似的に除去した後でフーリエ展開してもよい。

【0025】

基本波成分および時間高調波成分の抽出精度を上げるためには、初期の非定常場での解析結果である解析対象の物理量に対して、算出された解析対象の物理量を或る時間幅で時間平均化処理を実施して、ある程度以上の補正に寄与しない時間高調波成分を近似的に除

10

20

30

40

50

去した方がよい。本実施例におけるステップ 24 の補正では、その時間平均化処理を反映した時間高調波次数を用いた補正式が用いられる。勿論、そのような時間高調波成分が小さいか、含まれていなければ、このような平均化処理は不要である。

【 0 0 2 6 】

解析対象の物理量の補正において、フーリエ展開するためには半周期あるいは一周期の、解析対象の物理量の解析結果が必要である。本実施例では、半周期よりも短い解析結果から基本波および時間高調波を抽出することにより、近似的な定常場での解析対象の物理量を得る補正について説明する。

【 0 0 2 7 】

説明を簡単にするために、電気角で表現した時間変数 θ を用いて一変数場 $x(\theta)$ に関して述べる。定常場が半周期性の場合、すなわち、 $x(\theta + \pi) = -x(\theta)$ の条件を満足する場合には、定常場は奇数次の時間高調波のみで構成される。時定数 τ の減衰場を考慮すると、 $x(\theta)$ は、例えば、式 (1) で表される。

【 0 0 2 8 】

【数 1】

$$x(\theta) = a_0 e^{-\gamma\theta} + \sum_{k=1}^p x_{n_k}(\theta) + \sum_{l \neq k} x_l(\theta) \quad \dots (1)$$

【 0 0 2 9 】

ここで、 a_0 は減衰成分項の初期値で、 x_{n_k} は考慮する時間高調波成分で、 x_l は考慮されない時間高調波成分で、 γ は減衰成分項の減衰時定数の逆数である。式 (1) の右辺第 3 項目は、入力された時間高調波次数の時間高調波以外の時間高調波 (サブ高調波) を意味する。変数 θ は電気角で表現した時間変数である。サブ高調波の補正への影響を低減するために、式 (1) を時間平均する。この時間平均場を $y = y(\theta) = \langle x(\theta) \rangle$ とし、時間平均化のための位相幅を 2ϕ とすると、式 (1) は近似的に式 (2) で表される。

【 0 0 3 0 】

【数 2】

$$y(\theta) \cong a'_0 e^{-\gamma\theta} + \sum_{k=1}^p y_{n_k}(\theta) \quad \dots (2)$$

【 0 0 3 1 】

ここで、 $y_{n_k}(\theta)$ は式 (3) で表される。

【 0 0 3 2 】

【数 3】

$$y_{n_k}(\theta) = \langle x_{n_k}(\theta) \rangle = \left(\frac{\sin n_k \phi}{n_k \phi} \right) x_{n_k}(\theta - \phi) \quad \dots (3)$$

【 0 0 3 3 】

ここで、 ϕ は時間平均幅を基本波成分の位相幅に変換した値の半分である。なお、後述の実施例 2 は、主要時間高調波を除く時間高調波の補正への影響が微小であり、この場合は時間平均化のための位相幅 2ϕ は 0 と考えられる。このため、本実施例と統一的に記述できる。式 (3) に $2m$ 階の時間微分を施すと、式 (4) が得られる。

【 0 0 3 4 】

【数 4】

$$\frac{d^{2m}y(\theta)}{d\theta^{2m}} \cong \sum_{k=1}^p (-)^m n_k^{2m} y_{n_k}(\theta) \quad \dots (4)$$

2 p 階までの時間微分を用いると、 $m=1, 2, \dots, p$ の p 個の連立方程式が得られ、 p 個の時間高調波 $y_{n_k}(\theta)$ の値を求めることができる。式 (3) を考慮すると、元の未知数場 $x(\theta)$ の定常場を求めるための時間高調波次数補正式として、式 (5) が得られる。

【0 0 3 5】

【数 5】

$$x^{new}(\theta - \phi) = \sum_{k=1}^p g_{n_k} y_{n_k}(\theta), \quad g_{n_k} = \frac{n_k \phi}{\sin n_k \phi} \quad \dots (5)$$

【0 0 3 6】

ここで、 x^{new} は補正後の x を表す。数値的に 2 p 階の時間微分値を得るには (2 p + 1) ステップの値を用いる必要があり、数値微分の計算精度を上げるために中心差分を用いることを考えると、平均化のための位相幅の半分の ϕ に加えて p ステップ分過去にさかのぼって補正することになる。時間高調波の個数が 1、2、3 個のそれぞれの場合について、時間高調波を考慮した補正アルゴリズムを示す。便宜上、 $y(\theta)$ の $2m$ 階微分を $y^{(2m)}(\theta)$ と表す。

【0 0 3 7】

1 個の n 次時間高調波を考慮した時間高調波次数補正式を導き出す。式 (2) は、式 (6) のように表される。

【0 0 3 8】

【数 6】

$$y(\theta) = a_0' e^{-\gamma \theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) \quad \dots (6)$$

【0 0 3 9】

ここで、式 (6) の 2 階微分および 4 階微分は、式 (7) および式 (8) のようになる。

【0 0 4 0】

【数 7】

$$y^{(2)}(\theta) = -y_1(\theta) - n^2 y_n(\theta) \quad \dots (7)$$

【0 0 4 1】

【数 8】

$$y^{(4)}(\theta) = y_1(\theta) + n^4 y_n(\theta) \quad \dots (8)$$

【0 0 4 2】

ここで、 $N = n^2$ とおくと、式 (7) および式 (8) より、式 (9) および式 (10) が得られる。

【0 0 4 3】

【数 9】

$$y_1(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N - 1} \quad \dots (9)$$

【0 0 4 4】

【数 10】

$$y_n(\theta) = \frac{y^{(2)}(\theta) + y^{(4)}(\theta)}{N(N - 1)} \quad \dots (10)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 4 5 】

式 (9) および式 (1 0) を用いて、1 個の n 次時間高調波を考慮した時間高調波次数補正式は式 (1 1) のように表される。

【 0 0 4 6 】

【 数 1 1 】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) \quad \dots (11)$$

【 0 0 4 7 】

次に、 n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮した時間高調波次数補正式を導き出す。式 (2) は式 (1 2) のように表される。

10

【 0 0 4 8 】

【 数 1 2 】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-\gamma \theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) \quad \dots (12)$$

【 0 0 4 9 】

ここで、 a'_0 は時間平均後の減衰項成分の初期値である。式 (1 2) の 2 階微分、4 階微分、6 階微分は、式 (1 3)、式 (1 4) および式 (1 5) のようになる。

【 0 0 5 0 】

【 数 1 3 】

$$y^{(2)}(\theta) = -y_1(\theta) - n^2 y_n(\theta) - m^2 y_m(\theta) \quad \dots (13)$$

20

【 0 0 5 1 】

【 数 1 4 】

$$y^{(4)}(\theta) = y_1(\theta) + n^4 y_n(\theta) + m^4 y_m(\theta) \quad \dots (14)$$

【 0 0 5 2 】

【 数 1 5 】

$$y^{(6)}(\theta) = -y_1(\theta) - n^6 y_n(\theta) - m^6 y_m(\theta) \quad \dots (15)$$

30

【 0 0 5 3 】

ここで、 $N = n^2$ 、 $M = m^2$ とおくと、式 (1 3)、式 (1 4) および式 (1 5) より式 (1 6)、式 (1 7) および式 (1 8) が得られる。

【 0 0 5 4 】

【 数 1 6 】

$$y_1(\theta) = -\frac{N M y^{(2)}(\theta) + (N + M) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{(N - 1)(M - 1)} \quad \dots (16)$$

【 0 0 5 5 】

【 数 1 7 】

$$y_n(\theta) = -\frac{M y^{(2)}(\theta) + (M + 1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{N(N - 1)(N - M)} \quad \dots (17)$$

40

【 0 0 5 6 】

【 数 1 8 】

$$y_m(\theta) = -\frac{N y^{(2)}(\theta) + (N + 1) y^{(4)}(\theta) + y^{(6)}(\theta)}{M(M - 1)(M - N)} \quad \dots (18)$$

【 0 0 5 7 】

式 (1 6)、式 (1 7) および式 (1 8) を用いて、 n 次および m 次の 2 個の時間高調波を考慮した時間高調波次数補正式である式 (1 9) を得ることができる。

50

【 0 0 5 8 】

【 数 1 9 】

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) \quad \dots (19)$$

【 0 0 5 9 】

次に、n 次、m 次および k 次の 3 個の時間高調波を考慮した時間高調波次数補正式を導き出す。式 (2) は式 (2 0) で表される。

【 0 0 6 0 】

【 数 2 0 】

$$y(\theta) = a'_0 e^{-j\theta} + y_1(\theta) + y_n(\theta) + y_m(\theta) + y_k(\theta) \quad \dots (20)$$

10

【 0 0 6 1 】

式 (2 0) の 2 階微分、4 階微分、6 階微分および 8 階微分は、式 (2 1)、式 (2 2)、式 (2 3) および式 (2 4) のようになる。

【 0 0 6 2 】

【 数 2 1 】

$$y^{(2)}(\theta) = -y_1(\theta) - n^2 y_n(\theta) - m^2 y_m(\theta) - k^2 y_k(\theta) \quad \dots (21)$$

【 0 0 6 3 】

【 数 2 2 】

$$y^{(4)}(\theta) = y_1(\theta) + n^4 y_n(\theta) + m^4 y_m(\theta) + k^4 y_k(\theta) \quad \dots (22)$$

20

【 0 0 6 4 】

【 数 2 3 】

$$y^{(6)}(\theta) = -y_1(\theta) - n^6 y_n(\theta) - m^6 y_m(\theta) - k^6 y_k(\theta) \quad \dots (23)$$

【 0 0 6 5 】

【 数 2 4 】

$$y^{(8)}(\theta) = y_1(\theta) + n^8 y_n(\theta) + m^8 y_m(\theta) + k^8 y_k(\theta) \quad \dots (24)$$

30

【 0 0 6 6 】

ここで、 $N = n^2$ 、 $M = m^2$ 、 $K = k^2$ とおくと、式 (2 1)、式 (2 2)、式 (2 3) および式 (2 4) より式 (2 5)、式 (2 6)、式 (2 7) および式 (2 8) が得られる。

【 0 0 6 7 】

【 数 2 5 】

$$y_1(\theta) = -\frac{NMKy^{(2)}(\theta) + (NM + MK + KN)y^{(4)}(\theta) + (N + M + K)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{(N-1)(M-1)(K-1)} \quad \dots (25)$$

【 0 0 6 8 】

【 数 2 6 】

$$y_n(\theta) = \frac{MKy^{(2)}(\theta) + (MK + M + K)y^{(4)}(\theta) + (M + K + 1)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{N(N-1)(N-M)(N-K)} \quad \dots (26)$$

40

【 0 0 6 9 】

【 数 2 7 】

$$y_m(\theta) = \frac{KNy^{(2)}(\theta) + (KN + K + N)y^{(4)}(\theta) + (K + N + 1)y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{M(M-1)(M-K)(M-N)} \quad \dots (27)$$

【 0 0 7 0 】

50

【数 2 8】

$$y_k(\theta) = \frac{NM y^{(2)}(\theta) + (NM + N + M) y^{(4)}(\theta) + (N + M + 1) y^{(6)}(\theta) + y^{(8)}(\theta)}{K(K-1)(K-N)(K-M)} \quad \dots (28)$$

【0 0 7 1】

式(24)より式(25)、式(26)、式(27)および式(28)を用いて、n次、m次およびk次の3個の時間高調波を考慮した時間高調波次数補正式である式(29)が得られる。

【0 0 7 2】

【数 2 9】

10

$$x^{new}(\theta - \phi) = g_1 y_1(\theta) + g_n y_n(\theta) + g_m y_m(\theta) + g_k y_k(\theta) \quad \dots (29)$$

【0 0 7 3】

以上のように、時間高調波の個数がn個の場合は、2(n+1)階までの偶数階微分値を用いて、補正ができる。

【0 0 7 4】

ここで、2階、4階、6階および8階の微分を数値的に求めるための式を示す。各微分は高精度の計算式として中心差分の形式で表す。第s時間ステップ目における各微分式は、式(30)、式(31)、式(32)および式(33)のようになる。

【0 0 7 5】

20

【数 3 0】

$$y^{(2)} = \frac{y_{(s+1)} - 2y_{(s)} + y_{(s-1)}}{(\Delta\theta)^2} \quad \dots (30)$$

【0 0 7 6】

【数 3 1】

$$y^{(4)} = \frac{y_{(s+2)} - 4y_{(s+1)} + 6y_{(s)} - 4y_{(s-1)} + y_{(s-2)}}{(\Delta\theta)^4} \quad \dots (31)$$

【0 0 7 7】

30

【数 3 2】

$$y^{(6)} = \frac{y_{(s+3)} - 6y_{(s+2)} + 15y_{(s+1)} - 20y_{(s)} + 15y_{(s-1)} - 6y_{(s-2)} + y_{(s-3)}}{(\Delta\theta)^6} \quad \dots (32)$$

【0 0 7 8】

【数 3 3】

$$y^{(8)} = \frac{y_{(s+4)} - 8y_{(s+3)} + 28y_{(s+2)} - 56y_{(s+1)} + 70y_{(s)} - 56y_{(s-1)} + 28y_{(s-2)} - 8y_{(s-3)} + y_{(s-4)}}{(\Delta\theta)^8} \quad \dots (33)$$

【0 0 7 9】

40

このように、高階微分を得るためには、多くの時間ステップにわたる計算が必要になるために、あまり多くの時間高調波を考慮すると、それだけ、補正に要する時間ステップ数が多くなる。このため、あまり多くの時間高調波を考慮すると、補正に要する計算時間を短縮する上では不利になる。

【0 0 8 0】

また、変数場x()に関する位相幅2 の時間平均化処理が、時刻(s - q)ステップから時刻(s + q)ステップ目までの時間平均に相当するとして、時間平均y(s)は、式(34)で表すことができる。

【0 0 8 1】

【数 3 4】

$$y_{(s)} = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=s-q}^{s+q} x_j \quad \dots (34)$$

【 0 0 8 2 】

この場合、時刻 t_{s+q} まで計算された x の値を用いて、時刻 t_s における値が補正されるため、補正の際に q ステップだけ過去にさかのぼることになる。なお、時間平均を実施しない場合は $q = 0$ で、時間平均処理によって過去にさかのぼることはない。さらに、 $2p$ 階の時間微分を計算するためには、 p ステップだけ過去にさかのぼる必要があり、結局、 $(q+p)$ ステップだけ過去にさかのぼることになる。なお、過去にさかのぼるステップ数が $(q+p)$ と異なっても、それなりの補正効果がでるので、過去にさかのぼるステップ数は $(q+p)$ に限定されるものではない。

10

【 0 0 8 3 】

本実施例のステップ 24 では、式 (5)、式 (11)、式 (19) および式 (29) のいずれかの時間高調波次数補正式を用いて、時間ステップごとの、解析対象の物理量を補正する。ステップ 24 で、式 (5)、式 (11)、式 (19) および式 (29) のどの時間高調波次数補正式が使用されるかは、ステップ 12 で、表示装置 6 に表示された式 (5)、式 (11)、式 (19) および式 (29) の各時間高調波次数補正式からオペレータがマウスにより選択することによって決定される。式 (5)、式 (11)、式 (19) および式 (29) の各時間高調波次数補正式は、時間平均の時間高調波次数補正式である。ステップ 24 の補正は、その選択によりステップ 12 で入力された時間平均幅および時間高調波次数を用いて、ステップ 22 で記憶装置 4 に記憶された時間ステップごとの、解析対象の物理量を補正する。この補正に用いられる時間平均幅および時間高調波次数を用いた補正式は、ステップ 23 で算出された解析対象の物理量の時間平均量が反映されている。具体的には、この物理量の時間平均量ならびにその偶数階時間微分量を用いて、式 (5) に含まれる考慮対象の時間平均高調波成分が算出される。

20

【 0 0 8 4 】

補正が所定回数実行されたかが判定される (ステップ 26)。ステップ 24 での補正が、ステップ 12 で入力した補正回数になったかが判定される。この判定結果が「No」であるとき、ステップ 21 からステップ 26 の各処理が実行される。ステップ 26 の判定が「Yes」であるとき、ステップ 27 の解析が実行される。

30

【 0 0 8 5 】

微分方程式を用いた過度解析により解析対象の定常後の物理量を算出する第 2 解析を行う (ステップ 27)。ステップ 24 の補正により解析対象の物理量が定常状態になる。その後、ステップ 27 では、解析対象の定常後の物理量が、ステップ 21 の解析で用いられた微分方程式を用いた過度解析により算出される (第 2 解析の実行)。この過度解析により、一周期の定常場における解析対象の物理量が、時間ステップごとに得られる。

【 0 0 8 6 】

ステップ 27 で得られた解析結果が記憶装置に記憶される (ステップ 31)。ステップ 27 で得られた定常場での時間ステップごとの解析対象の各物理量が、CPU 3 により、記憶装置 4 に記憶される。解析結果が表示装置に表示される (ステップ 32)。CPU 3 が、ステップ 27 での過度解析で得られた、解析対象の定常後の時間ステップごとの物理量を、入出力インタフェース 5 を介して表示装置 6 に出力する。この結果、解析対象の定常後の時間ステップごとの物理量が表示装置 6 に表示される。ステップ 32 において、CPU 3 は、ステップ 21 の過度解析により得られた、解析対象の時間ステップごとの物理量、およびステップ 24 の補正により得られた、解析対象の時間ステップごとの物理量を、入出力インタフェース 5 を介して表示装置 6 に出力する。これらの物理量が表示装置 6 に表示される。解析対象の定常後の時間ステップごとの物理量は、本実施例の高速定常場解析方法による解析の解であるので、表示装置 6 に必ず表示させる必要がある。ステップ 21 の過度解析により得られた物理量、およびステップ 24 の補正により得られた物理量

40

50

は必要に応じて表示装置 6 に表示される。

【 0 0 8 7 】

発明者らは、本実施例における具体的な補正の効果を示すために、2 変数 x 、 y に関する連立微分方程式を対象にしたサンプルモデルを考えた。例として、ソース項に 3 次、5 次、7 次の時間高調波が存在する式 (3 5) の連立微分方程式を取り上げる。なお、式 (5)、式 (1 1)、式 (1 9) および式 (2 9) は、ステップ 2 1 で算出された物理量を、定常場に近づけるための補正式であり、式 (3 5) はサンプルの微分方程式 (対象の物理量に関する支配方程式) である。

【 0 0 8 8 】

【 数 3 5 】

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \tau \begin{pmatrix} dx/dt \\ dy/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \theta + \frac{1}{2} \sin 3\theta + \frac{1}{4} \sin 5\theta + \frac{1}{6} \sin 7\theta \end{pmatrix} \quad \cdots (35)$$

【 0 0 8 9 】

式 (3 5) において初期値を $x = 0.1$ 、 $y = 0.8$ とした場合の解析結果を図 3 および図 4 に示す。

【 0 0 9 0 】

図 3 は、ステップ 2 1 の過度解析により得られた解析対象の物理量に対して、補正をしない場合、簡易 TP - EEC 法で補正した場合、TP - EEC 法で補正した場合、TDC 法で補正した場合、および本実施例において 3 個の時間高調波を考慮した、時間平均の時間高調波次数補正式 (時間平均の時間高調波次数) により補正した場合 (特性 5 3) の 5 ケースについて、 y の時間変化を示している。図 3 より、従来の簡易 TP - EEC 法、TP - EEC 法および TDC 法による補正に比べて、本実施例における補正は、最も速く定常場に収束することが分かる。

【 0 0 9 1 】

図 4 は、ステップ 2 1 の過度解析により得られた解析対象の物理量に対して、補正をしない場合、簡易 TP - EEC 法で補正した場合、TP - EEC 法で補正した場合、TDC 法で補正した場合、および本実施例における時間平均の時間高調波次数により補正した場合について、定常理論解と補正後の物理量との誤差の時間変化を示している。本実施例については、3 次の時間高調波を考慮した時間平均の時間高調波次数により補正した例 (特性 5 1)、3 次および 5 次の時間高調波を考慮した時間平均の時間高調波次数により補正した例 (特性 5 2)、および 3 次、5 次および 7 次の時間高調波を考慮した時間平均の時間高調波次数により補正した例 (特性 5 3) の 3 つのケースを示している。図 4 から、本実施例における補正は、少ない時間ステップで早めに定常場が得られ、補正をしない場合、簡易 TP - EEC 法で補正した場合、TP - EEC 法で補正した場合に比べて定常理論解と補正後の物理量の誤差が小さい、すなわち、精度の良い物理量が得られることが分かる。

【 0 0 9 2 】

本実施例の高速定常場解析方法を実行する電子計算機 1 は、高速定常場解析装置として機能し、ステップ 2 1 を実行する解析手段 (第 1 解析手段)、ステップ 2 2 および 3 1 のそれぞれを実行する解析結果 (算出された物理量) を記憶装置に記憶させる手段、ステップ 2 3 を実行する時間量算出手段 (時間平均手段)、ステップ 2 4 を実行する補正手段 (第 1 補正手段)、ステップ 2 6 を実行する判定手段、およびステップ 2 7 を実行する解析手段 (第 2 解析手段) を有している。ステップ 2 1 を実行する解析手段 (第 1 解析手段) およびステップ 2 7 を実行する解析手段 (第 2 解析手段) を、1 つの解析手段にしても良い。

【 0 0 9 3 】

本実施例によれば、解析対象の物理量の時間高調波を考慮して解析対象の過度解析により得られた物理量を補正するので、時間微分項を含む現象の過度解析において、解析対象

10

20

30

40

50

の定常状態における物理量（定常解）をより短時間に且つ精度良く求めることができる。さらに、本実施例は、特に、時間平均の物理量（算出された解析対象の物理量の時間平均量）を考慮して補正を行っているので、コントロールデータ１２に入力していない時間高調波次数をもつ時間高調波（サブ高調波）による補正への影響を低減することができ、得られた定常解の精度をさらに向上させることができる。

【実施例２】

【００９４】

本発明の他の実施例である実施例２の高速定常場解析方法を、図５を用いて以下に説明する。本実施例の高速定常場解析方法も、演算装置である電子計算機１を用いて実行される。

10

【００９５】

本実施例の、電子計算機１で実行される高速定常場解析方法の処理手順（プログラム）は、図５に示す各処理を含んでおり、電子計算機１の記憶装置４に記憶されている。本実施例で用いられる図５に示す処理手順は、実施例１で用いられる図１に示す処理手順においてステップ１２をステップ１２Ａに、解析プロセス２０を解析プロセス２０Ａに替えた処理手順を有する。本実施例で用いられる図５に示す処理手順の他の処理は実施例１で用いられる図１に示す処理手順と同じである。解析プロセス２０Ａは、補正プロセス２５Ａ、およびステップ２６および２７の各処理を含んでいる。補正プロセス２５Ａは、補正プロセス２５においてステップ２３の処理を削除し、ステップ２４の処理をステップ２４Ａの処理に替えた処理手順を有する。補正プロセス２５Ａの他の処理手順は補正プロセス２５の処理手順と同じである。

20

【００９６】

本実施例の高速定常場解析方法の実施例１と異なる部分を主に説明する。ステップ１２Ａでは、ステップ１２で行われる時間平均幅の入力が行われず、補正回数の値および今回の解析に用いる時間高調波次数補正式が入力される。解析対象の離散化データの入力（ステップ１１）、過度解析による解析対象の物理量の算出（ステップ２１）および解析結果の記憶装置への記憶（ステップ２２）が、実施例１と同様に行われる。

【００９７】

時間高調波次数を用いて解析対象の物理量を補正する（ステップ２４Ａ）。記憶装置４に記憶した時間ステップごとの、解析対象の物理量を、ステップ１２Ａで入力した時間高調波次数補正式を用いて補正する。ステップ２４Ａの補正に使用される時間高調波次数補正式は、式（５）、式（１１）、式（１９）および式（２９）の各時間高調波次数を用いた補正式において ω を 0 にしたいずれかの時間高調波次数を用いた補正式である。ステップ２４Ａにおいて、算出された解析対象の時間ステップごとの物理量が、時間高調波次数を用いた補正式、すなわち、基本波と時間高調波により補正される。

30

【００９８】

その後、実施例１と同様に、ステップ２６、２７、３１及び３２の各処理が実行される。ステップ３２において、ステップ２７での過度解析で得られた、解析対象の定常後の時間ステップごとの物理量が、表示装置６に表示される。ステップ２１の過度解析により得られた物理量、およびステップ２４の補正により得られた物理量も、表示装置６に表示される。

40

【００９９】

本実施例の高速定常場解析方法を実行する電子計算機１は、高速定常場解析装置として機能し、ステップ２１を実行する解析手段（第１解析手段）、ステップ２２および３１のそれぞれを実行する解析結果（算出された物理量）を記憶装置に記憶させる手段、ステップ２４Ａを実行する補正手段（第１補正手段）、ステップ２６を実行する判定手段、およびステップ２７を実行する解析手段（第２解析手段）を有している。ステップ２１を実行する解析手段（第１解析手段）およびステップ２７を実行する解析手段（第２解析手段）を、１つの解析手段にしても良い。

【０１００】

50

本実施例も、実施例 1 と同様に、解析対象の物理量の時間高調波を考慮して解析対象の過度解析により得られた物理量を補正するので、時間微分項を含む現象の過度解析において、解析対象の定常状態における物理量（定常解）をより短時間に且つ精度良く求めることができる。本実施例は、解析対象の物理量の時間高調波を考慮した補正を行っていないので、実施例 1 よりも、解析対象の定常状態における物理量（定常解）を得る時間が長くなる。しかしながら、本実施例は、主用時間高調波を除く時間高調波の補正への影響が微小な場合には、実施例 1 と同様に、解析対象の定常状態における物理量（定常解）をより短時間に求めることができる。

【実施例 3】

【0101】

本発明の他の実施例である実施例 3 の高速定常場解析方法を、図 6 を用いて以下に説明する。本実施例の高速定常場解析方法も、演算装置である電子計算機 1 を用いて実行される。

【0102】

本実施例の、電子計算機 1 で実行される高速定常場解析方法の処理手順（プログラム）は、図 6 に示す各処理を含んでおり、電子計算機 1 の記憶装置 4 に記憶されている。本実施例で用いられる図 6 に示す処理手順は、実施例 2 で用いられる図 5 に示す処理手順において解析プロセス 20 A を解析プロセス 20 B に替えた処理手順を有する。本実施例で用いられる図 6 に示す処理手順の他の処理は実施例 2 で用いられる図 5 に示す処理手順と同じである。解析プロセス 20 B は、解析プロセス 20 A においてステップ 21 A、28 および 26 A の各処理を追加した処理手順を有する。解析プロセス 20 B の他の処理手順は解析プロセス 20 A の処理手順と同じである。本実施例の高速定常場解析方法は、実施例 2 の高速定常場解析方法において、ステップ 24 A の時間高調波次数を用いた解析対象の物理量の補正に加えて、ステップ 28 の TDC 法（または TP - EEC 法）による補正を実施している。

【0103】

本実施例の高速定常場解析方法の実施例 2 と異なる部分を主に説明する。本実施例のステップ 12 A では、補正回数の値として、ステップ 24 A による補正の補正回数の値、およびステップ 28 による補正の補正回数の値がそれぞれ入力される。本実施例においてステップ 12 A で入力されるステップ 24 A による補正の補正回数とステップ 28 による補正の補正回数の合計値は、実施例 2 においてステップ 12 A で入力されるステップ 24 A による補正の補正回数と同じである。

【0104】

本実施例でも実施例 2 で実行されるステップ 21、22 及び 24 A の各処理が実行され、ステップ 26 でステップ 24 A の補正の回数が本実施例のステップ 12 A で入力した補正回数になったとき、ステップ 21 と同様な過度解析により解析対象の物理量が算出される第 3 解析を行う（ステップ 21 A）。ステップ 21 A では、ステップ 21 において用いられた解析実行モジュールを用いた過度解析により、ステップ 24 A で補正された時間ステップ以降における解析対象の物理量を算出する（第 3 解析の実行）。TP - EEC 法（または TDC 法）を用いて算出された解析対象の物理量を補正する（ステップ 28）。ステップ 21 A の処理で得られた解析対象の時間ステップごとの物理量を、高階微分を含まない TP - EEC 法（または TDC 法）を用いて補正する。

【0105】

補正が所定回数実行されたかが判定される（ステップ 26 A）。ステップ 28 での補正が、ステップ 12 で入力したステップ 28 に対する補正回数になったかが判定される。この判定結果が「No」であるとき、ステップ 21 A、28 およびステップ 26 A の各処理が繰り返される。ステップ 26 A の判定が「Yes」であるとき、ステップ 27 の解析（第 2 解析）が実行される。ステップ 27 の解析が終了した後、実施例 2 と同様に、ステップ 31 及び 32 の処理が実行される。

【0106】

ステップ 3 2 において、ステップ 2 7 での過度解析で得られた、解析対象の定常後の時間ステップごとの物理量が、表示装置 6 に表示される。ステップ 2 1 の過度解析により得られた物理量、およびステップ 2 4 の補正により得られた物理量も、表示装置 6 に表示される。

【 0 1 0 7 】

本実施例の高速定常場解析方法を実行する電子計算機 1 は、高速定常場解析装置として機能し、ステップ 2 1 および 2 1 A を実行する解析手段（第 1 解析手段）、ステップ 2 2 および 3 1 のそれぞれを実行する解析結果（算出された物理量）を記憶装置に記憶させる手段、ステップ 2 4 A を実行する補正手段（第 1 補正手段）、ステップ 2 6 を実行する判定手段（第 1 判定手段）、ステップ 2 8 を実行する補正手段（第 2 補正手段）、ステップ 2 6 A を実行する判定手段（第 2 判定手段）、およびステップ 2 7 を実行する解析手段（第 2 解析手段）を有している。ステップ 2 1 および 2 1 A を実行する解析手段（第 1 解析手段）およびステップ 2 7 を実行する解析手段（第 2 解析手段）を、1 つの解析手段にしても良い。

【 0 1 0 8 】

本実施例も、実施例 1 と同様に、解析対象の物理量の時間高調波を考慮して解析対象の過度解析により得られた物理量を補正するので、時間微分項を含む現象の過渡解析において、解析対象の定常状態における物理量（定常解）をより短時間に且つ精度良く求めることができる。さらに、本実施例によれば、時間高調波を考慮した高速補正をまず実行して近似的な定常場を得た後に、高階微分を含まない T P - E E C 法（または T D C 法）による補正により、より確実かつより短時間に定常解を得ることができる。

【 0 1 0 9 】

本実施例において、実施例 1 におけるステップ 2 3 の処理を追加し、ステップ 1 2 A をステップ 1 2 に、ステップ 2 4 A をステップ 2 4 にそれぞれ替えてもよい。これにより、本実施例においても、時間平均量を考慮した補正を行うことができる。

【 実施例 4 】

【 0 1 1 0 】

本発明の他の実施例である実施例 4 の高速定常場解析方法を以下に説明する。本実施例は、実施例 1 の高速定常場解析方法を磁場解析に適用した例である。

【 0 1 1 1 】

代表的な解法として、磁気ベクトルポテンシャルを用いた有限要素法解析について説明する。節点要素有限要素法では、メッシュ分割された解析空間の各節点に、ベクトル 3 成分の未知変数（ A_x 、 A_y 、 A_z ）が配置される。また、辺要素有限要素法では、メッシュ分割された解析空間の各要素の辺に、未知変数 a_j が配置される。辺要素有限要素法での未知変数 a_j は、各要素の辺上への磁気ベクトルポテンシャルの射影成分の、辺上における線積分量である。

【 0 1 1 2 】

これらの物理量の未知変数に対して、実施例 1 における解析対象の物理量 x と同様な補正を実施する。すなわち、ステップ 2 1 により得られた過渡解析結果（解析対象の物理量 x ）を用い、ステップ 1 2 で入力された式（5）、式（11）、式（19）、および式（29）のいずれかの時間平均の時間高調波次数補正式を用いた補正を各未知変数について実施する。この補正は 1 回、あるいは複数回実施する。一連の補正には、上記のうちいずれか 1 つの時間平均の時間高調波次数補正式を用いてもよく、また、異なる式と組み合わせることも可能である。

【 0 1 1 3 】

回転機（モータ、発電機）の場合、固定子では、発生する電磁場が磁場の向きが正負に反転する交流場であるため、半周期境界条件が成立する。一方、回転子には、磁石や直流電流が流れる励磁コイルが設けられている場合がある。この場合には磁場の直流成分が存在する。回転子の回転による磁気回路の変動により、回転子の磁場の直流成分に、固定子の複数の歯と歯の間のスロットの回転移動によって発生するスロット高調波が存在する。

この場合、回転子では、直流成分に交流成分が重畳した磁場が発生し、半周期境界条件が成立せず、一周境界条件のみが成立する。

【0114】

従って、このような回転機に対する磁場解析では、固定子には半周期境界条件に対応した補正を、回転子には一周境界条件に対応した補正をかけると、定常磁場が高速に求まる。なお、回転子の磁場にのるスロット高調波は小さな変動にすぎないので、回転子に関しては補正をかけず、固定子のみに補正をかけても十分高速に定常場を求めることができる。

【0115】

また、渦電流による回転駆動を利用した誘導電動機では、回転子は回転磁場に対して遅い回転周波数で回転する。この周波数の差をすべり周波数と言うが、誘導電動機で定常場を高速に求めるためには、すべり周波数成分を基本波周波数として補正をかける。

10

【0116】

実施例1の高速定常場解析方法を磁場解析に適用した本実施例では、定常場に近い磁場分布が求められ、定常場への収束のための計算時間が大幅に短縮される。補正は、時間平均量の時間に関する二階微分値等を用いて容易に実行することができ、計算コストがほとんどかからない。

【0117】

渦電流を伴う磁場解析の場合、或る休止ステップ数において、場がある程度落ち着いた後に補正の準備計算を開始し、補正後も或る休止ステップ数をおいた後、次の補正のための準備計算を実施するのが効果的である。この場合、入力データには、休止ステップ数を入力する。

20

【0118】

実施例1の高速定常場解析方法を磁場解析に適用した本実施例も、実施例1で生じる各効果を得ることができる。

【0119】

磁場解析には、前述の実施例2及び3、および後述の実施例4のいずれも適用することができる。

【実施例5】

【0120】

30

本発明の他の実施例である実施例5の高速定常場解析方法を、図7を用いて以下に説明する。本実施例の高速定常場解析方法も、演算装置である電子計算機1を用いて実行される。

【0121】

本実施例の、電子計算機1で実行される高速定常場解析方法の処理手順（プログラム）は、図7に示す各処理を含んでおり、電子計算機1の記憶装置4に記憶されている。本実施例で用いられる図7に示す処理手順は、実施例3で用いられる図6に示す処理手順において解析プロセス20Bを解析プロセス20Cに替えた処理手順を有する。本実施例で用いられる図7に示す処理手順の他の処理は実施例3で用いられる図6に示す処理手順と同じである。解析プロセス20Cは、解析プロセス20Bにおいてステップ28をステップ28Aに替えた処理手順を有する。解析プロセス20Cの他の処理手順は解析プロセス20Bの処理手順と同じである。本実施例の高速定常場解析方法は、実施例3の高速定常場解析方法において、ステップ28のTDC法（またはTP-EEC法）による、解析対象の物理量の補正の替りに、ステップ28Aの3相交流TP-EEC法による補正を実施している。補正プロセス42はステップ21Aおよび28Aの各処理を含んでいる。

40

【0122】

補正に3相交流TP-EEC法を適用した本実施例の高速定常場解析方法の実施例3と異なる部分を主に説明する。

【0123】

3相交流TP-EEC法による補正を適用する場合には、ステップ21における微分方

50

程式を離散化した解析実行モジュールによる過度解析により算出される解析対象の物理量は、位相差 120 度の 3 相の物理量 U、V および W となる。ステップ 22 の処理が実行され、ステップ 24 A において時間高調波次数を用いた補正が行われる。本実施例では、3 相の物理量 U、V および W がステップ 21 の第 1 解析で算出されるため、ステップ 24 A における補正は、物理量 U、V および W のそれぞれに対して行われる。これらの物理量の補正に用いられる時間高調波次数補正式は、式 (5)、式 (11)、式 (19) および式 (29) のいずれかの式である。ただし、物理量 U を補正する場合には、式 (5)、式 (11)、式 (19) および式 (29) のいずれかの式において「x」が「U」に置き換えられる。物理量 V を補正する場合には、式 (5)、式 (11)、式 (19) および式 (29) のいずれかの式において「x」が「V」に置き換えられる。物理量 W を補正する場合には、式 (5)、式 (11)、式 (19) および式 (29) のいずれかの式において「x」が「W」に置き換えられる。このようにして、ステップ 21 で算出された時間ステップごとの物理量 U、V および W のそれぞれがステップ 24 A で補正される。

【0124】

ステップ 26 の判定が「Yes」になったとき、ステップ 21 A でも、ステップ 21 で過度解析により算出された最後の物理量の時間ステップ以降で、時間ステップごとに 3 相の物理量 U、V および W がそれぞれ算出される（第 3 解析の実行）。ステップ 28 A において、ステップ 21 A で算出された 3 相の物理量 U、V および W に対して、3 相交流 TP - EEC 法を用いた補正がそれぞれ行われる。

【0125】

この 3 相交流 TP - EEC 法を用いた補正の一例を具体的に以下に説明する。

【0126】

位相差 120 度の 3 相の物理量 U、V および W が、それぞれ、 U_0 、 V_0 および W_0 から 1/6 周期後に U_n 、 V_n および W_n になったとする。このとき、補正後の U である U^{new} 、補正後の V である V^{new} および補正後の W である W^{new} は、それぞれ、式 (36)、式 (37) および式 (38) のように表される。

【0127】

【数 36】

$$U^{new} = \frac{1}{2}(dU + dV - dW) \quad \dots (36)$$

【0128】

【数 37】

$$V^{new} = \frac{1}{2}(dV + dW - dU) \quad \dots (37)$$

【0129】

【数 38】

$$W^{new} = \frac{1}{2}(dW + dU - dV) \quad \dots (38)$$

【0130】

ここで、 dU 、 dV および dW は式 (39) のように表される。

【0131】

【数 39】

$$dU = U_n - U_0, \quad dV = V_n - V_0, \quad dW = W_n - W_0 \quad \dots (39)$$

【0132】

また、同じ 3 相でも、 $Z = -W$ とおいて、位相差 60 度の物理量である U、Z および V が、 U_0 、 Z_0 および W_0 から 1/6 周期後に U_n 、 Z_n および W_n になったとする。このとき、補正後の U である U^{new} 、補正後の V である V^{new} および補正後の W である W^{new} は、それぞれ、式 (40)、式 (41) および式 (42) のように表される。

【 0 1 3 3 】

【 数 4 0 】

$$U^{new} = \frac{1}{2}(dU + dZ + dV) \quad \dots (40)$$

【 0 1 3 4 】

【 数 4 1 】

$$Z^{new} = \frac{1}{2}(dZ + dV - dU) \quad \dots (41)$$

10

【 0 1 3 5 】

【 数 4 2 】

$$V^{new} = \frac{1}{2}(dV - dU - dZ) \quad \dots (42)$$

【 0 1 3 6 】

ここで、 dU 、 dV および dW は式(43)のように表される。

【 0 1 3 7 】

【 数 4 3 】

$$dU = U_n - U_0, \quad dZ = Z_n - Z_0, \quad dV = V_n - V_0 \quad \dots (43)$$

20

【 0 1 3 8 】

ステップ28Aでは、ステップ21Aで算出された3相の物理量 U 、 V および W に対して、式(36)、式(37)および式(38)(または式(40)、式(41)および式(42))を用いた補正が行われる。なお、ステップ28Aにおける式(36)、式(37)および式(38)と式(40)、式(41)および式(42)の使い分けは、以下の通りである。一周境界条件モデルの3相交流系(U 、 V 、 W 系)の場合では、ステップ28Aでの補正に、式(36)、式(37)および式(38)を用いる。半周期境界条件モデルの3相交流系(U 、 Z 、 V 系($Z = -W$))の場合では、ステップ28Aでの補正に、式(40)、式(41)および式(42)を用いる。

30

【 0 1 3 9 】

ステップ26Aの判定が「Yes」であるとき、ステップ27の解析(第2解析)が行われる。ステップ27の解析が終了した後、実施例3と同様に、ステップ31及び32の処理が実行される。

【 0 1 4 0 】

本実施例は、実施例2で生じる各効果を得ることができる。

【 0 1 4 1 】

本実施例の高速定常場解析方法を実行する電子計算機1は、高速定常場解析装置として機能し、ステップ21および21Aを実行する解析手段(第1解析手段)、ステップ22および31のそれぞれを実行する解析結果(算出された物理量)を記憶装置に記憶させる手段、ステップ24Aを実行する補正手段(第1補正手段)、ステップ26を実行する判定手段(第1判定手段)、ステップ28Aを実行する補正手段(第2補正手段)、ステップ26Aを実行する判定手段(第2判定手段)、およびステップ27を実行する解析手段(第2解析手段)を有している。ステップ21および21Aを実行する解析手段(第1解析手段)およびステップ27を実行する解析手段(第2解析手段)を、1つの解析手段にしても良い。

40

【 0 1 4 2 】

本実施例において、ステップ24Aにおける物理量 U 、 V および W のそれぞれの補正をTDC法によって行っても良い。このようにTDC法による補正を行った場合でも、ステップ28Aにおける補正は、TP-EEC法(または3相交流TP-EEC法)によって

50

行われる。

【 0 1 4 3 】

このように、TDC法による補正の後に、別途、TP-EEC法（または3相交流TP-EEC法）による補正を行うことによって、解析対象の物理量がTDC法のみで定常解が得られない場合でも、より確実に定常解を得ることができる。

【 0 1 4 4 】

なお、本実施例では、3相交流系の場合において、解析対象の物理量の補正に3相交流TP-EEC法を適用しているが、多相交流系の場合においては、多相交流TP-EEC法が適用できることは言うまでもない。

【 符号の説明 】

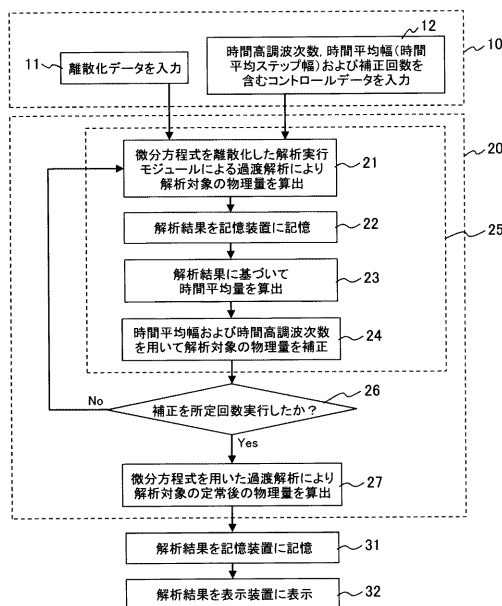
【 0 1 4 5 】

1 ... 電子計算機、2 ... 演算部、3 ... 中央処理装置、4 ... 記憶装置、5 ... 入力インタフェース、6 ... 表示装置、7 ... 入力装置。

10

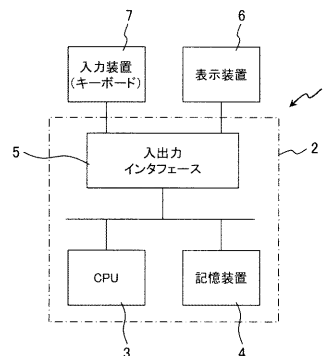
【 図 1 】

図 1



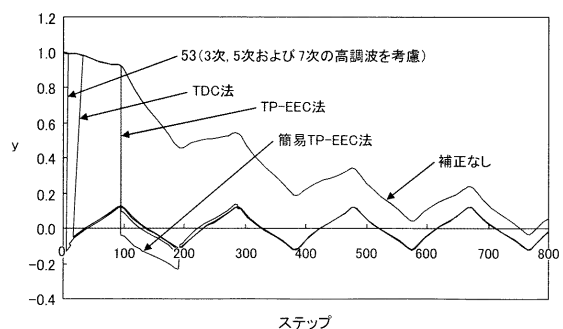
【 図 2 】

図 2



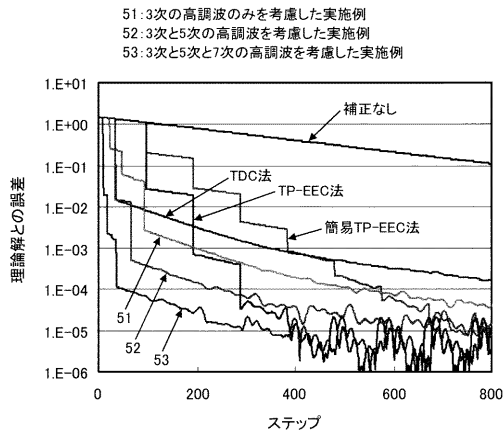
【 図 3 】

図 3



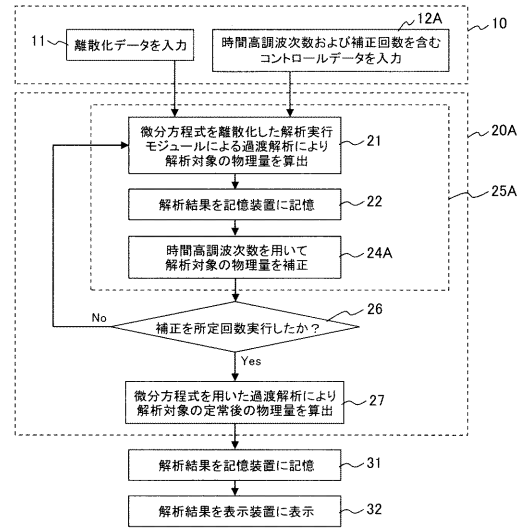
【図 4】

図 4



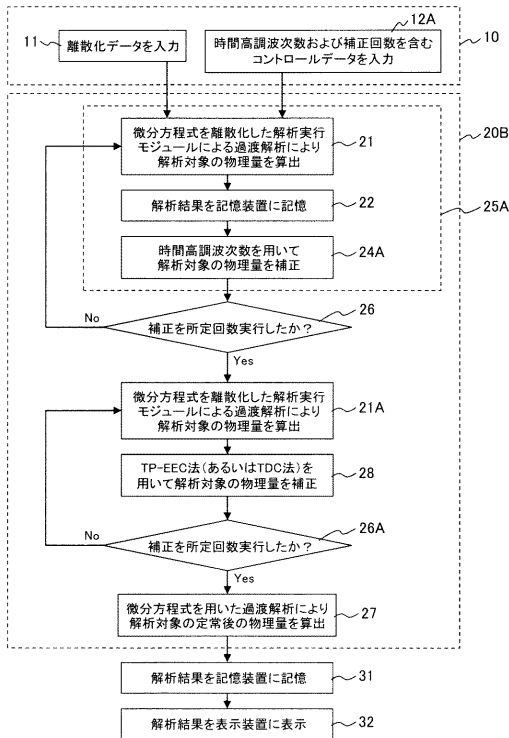
【図 5】

図 5



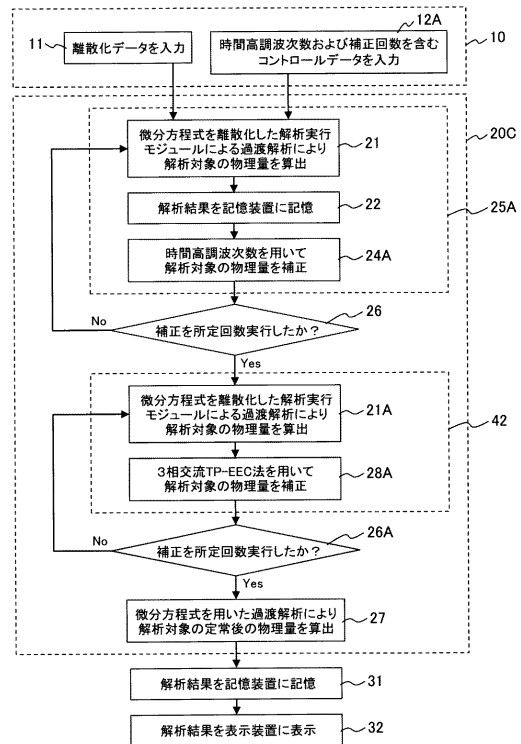
【図 6】

図 6



【図 7】

図 7



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平 1 1 - 0 2 3 6 3 2 (J P , A)

特開平 0 9 - 2 5 1 4 7 5 (J P , A)

特表平 0 8 - 5 0 7 3 9 9 (J P , A)

特許第 5 0 6 1 1 7 5 (J P , B 2)

高橋康人外 5 名，時間周期有限要素法と E E C 法に基づく非線形過渡電磁場解析における時間積分の収束性改善，電気学会論文誌 B，社団法人電気学会，2 0 0 9 年 6 月 1 日，第 1 2 9 巻，第 6 号，p . 7 9 1 - 7 9 8

(58)調査した分野(Int.Cl.，D B 名)

G 0 6 F 1 7 / 5 0

G 0 6 F 1 9 / 0 0

C i N i i