

대칭좌표 분리 고속화 알고리즘

김선태 정승기 송승호 김용래
광운대학교

An algorithm for faster symmetrical components separation

Sun Tae Kim Seung Ki Jung Seung Ho Song Young Rea Kim
Kwangwoon University

ABSTRACT

비대칭 부하 전류를 평형 상태로 만들기 위한 보상장치는 3상변수를 대칭좌표로 분리해야한다. 통상 전대역필터를 이용한 정상분, 역상분 분리 방식이 사용되는데 제어기 최하위단에서 동작하는 전대역필터의 대역폭이 전체 제어시스템의 대역폭을 제한한다. 따라서 보상장치의 제어성능을 향상시키기 위해서는 정역분리에 사용하는 필터의 대역폭을 넓혀야 한다. 본 논문에서는 대역폭이 조절가능한 고속화된 대칭좌표 분리 알고리즘을 제안한다. 이를 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, TMS320F28335를 이용하여 실험을 진행하였다.

1. 서론

최근 비대칭 부하나 발전량이 급변하는 비대칭 전원이 점점 증가하고 있다. 이런 불평형 계통은 전송선로의 포화를 불러오게 된다. 이를 보상장치로 계통을 평형화 시키게 되는데, 이때 정상분과 역상분을 분리해 내는 알고리즘이 필요하다. 통상 대칭좌표분리에는 전대역 필터를 사용하는데^[1] 이때 사용되는 전대역필터의 대역폭은 계통의 주파수로 제한된다. 이로 인해 보상전류를 제어하는 제어기 대역폭의 한계가 생긴다.

본 논문에서는 위의 필터 형식을 개선하여 샘플링된 두 점을 통해 정상분과 역상분의 합성 페이서도를 추정하며, 이를 통해 대칭좌표가 분리가능함을 확인한다. 또한 샘플링하는 각도를 적절히 조정하여 대역폭이 가변될 수 있음을 보인다. 이를 MATLAB/SIMULINK를 통한 시뮬레이션으로 확인하였으며 TMS320F28335로 실험하여 실증한다.

2. 대칭좌표 분리 고속화

2.1 고속화 대칭좌표 분리

계통이 불평형 상태일 경우 복소공간에서 공간벡터가 그리는 궤적은 원점이 중심인 타원이 된다. 수학적으로 타원은 두 점과 사잇각을 알게 될 경우 추측이 가능하다. 두 점과 그 사잇각을 통하여 타원의 궤적을 추정하면 순시적으로 정상분 성분과 역상분 성분을 분리해 낼 수 있다. 이를 수식으로 증명하며, 기하학적으로 같이 확인한다.

2.1.1 고속화 방안

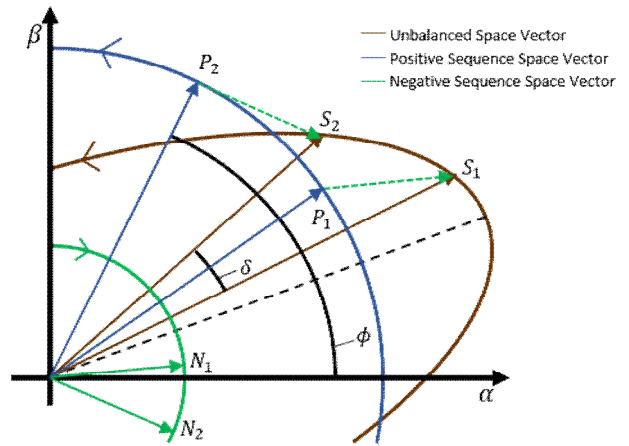


그림. 1 정상분과 역상분의 페이서도
Fig. 1 The phsor of positive and negative phase

표 1 불평형 계통의 파라미터
Table 1 Parameter of unbalanced grid

\bar{S}	Unbalanced space vector
S_α	Magnitude of Real axis
S_β	Magnitude of Imaginary axis
\bar{P}	Positive space vector
\bar{N}	Negative space vector
δ	Angle between two points(S_1, S_2)
ϕ	Phase of grid space vector

고속화 대칭좌표 분리를 위하여 그림 1과 같은 복소공간상의 정상분과 역상분 공간벡터를 생각해본다. 이때 각 변수는 표 1에서 나타낸것과 같다.

이때 공간벡터들의 상관관계에 의해 (1) (5)식이 유도된다.

$$\bar{S} = \bar{P} + \bar{N} \quad (1)$$

$$\bar{P} = P_\alpha + jP_\beta \quad (2)$$

$$\bar{N} = N_\alpha + jN_\beta \quad (3)$$

$$\bar{P}_2 = e^{j\delta} \bar{P}_1 \quad (4)$$

$$\bar{N}_2 = e^{-j\delta} \bar{N}_1 \quad (5)$$

(1) (5)의 식을 복소수 상등을 통해 식을 정리한 후 행렬로 나타내면 아래의 식 (6)으로 전개된다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos\delta - \sin\delta & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\delta & \cos\delta & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\delta & \sin\delta & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin\delta & \cos\delta & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\alpha_1} \\ P_{\beta_1} \\ N_{\alpha_1} \\ N_{\beta_1} \\ P_{\alpha_2} \\ P_{\beta_2} \\ N_{\alpha_2} \\ N_{\beta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\alpha_1} \\ S_{\beta_1} \\ S_{\alpha_2} \\ S_{\beta_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

좌변의 8*8행렬 판별식은 $4\sin^2\delta$ 이다. 즉 $\delta \neq n\pi$ (n =자연수) 일 경우 행렬의 rank는 8이 되어 위 식의 해가 유일하게 결정된다. 우선 $\delta \neq n\pi$ 라고 가정하고 식을 정리하면 (7) (14)식이 된다.

$$P_{\alpha_1} = \frac{1}{2}(S_{\alpha_1} + S_{\beta_2} \csc\delta - S_{\beta_1} \cot\delta) \quad (7)$$

$$P_{\beta_1} = \frac{1}{2}(S_{\beta_1} + S_{\alpha_1} \cot\delta - S_{\alpha_2} \csc\delta) \quad (8)$$

$$N_{\alpha_1} = \frac{1}{2}(S_{\alpha_1} + S_{\beta_1} \cot\delta - S_{\beta_2} \csc\delta) \quad (9)$$

$$N_{\beta_1} = \frac{1}{2}(S_{\beta_1} + S_{\alpha_2} \csc\delta - S_{\alpha_1} \cot\delta) \quad (10)$$

$$P_{\alpha_2} = \frac{1}{2}(S_{\alpha_2} + S_{\beta_2} \cot\delta - S_{\beta_1} \csc\delta) \quad (11)$$

$$P_{\beta_2} = \frac{1}{2}(S_{\beta_2} + S_{\alpha_1} \csc\delta - S_{\alpha_2} \cot\delta) \quad (12)$$

$$N_{\alpha_2} = \frac{1}{2}(S_{\alpha_2} + S_{\beta_1} \csc\delta - S_{\beta_2} \cot\delta) \quad (13)$$

$$N_{\beta_2} = \frac{1}{2}(S_{\beta_2} + S_{\alpha_2} \cot\delta - S_{\alpha_1} \csc\delta) \quad (14)$$

이때 행렬의 rank가 8이 되지 않는 경우를 살펴보면 δ 가 0이거나 π 일 때이다. 이를 기하학적인 관점에서 보면, 0의 경우 샘플링 된 두 점의 위상각이 없다는 뜻이므로 같은 점을 샘플링 했음을 의미한다. 또한 원점 대칭인 형태이므로 δ 가 π 일 경우 필연적으로 알게 되는 점이므로 기하학적으로도 행렬의 rank가 줄어드는 것이 합리적인 것을 알 수 있다. 실제 적용시 $\delta=0$ 인 점은 한 개의 점이므로 두 점을 샘플링하는데 있어 나타나지 않는 상황이다. $\delta=\pi$ 의 경우 대칭좌표 분리의 대역폭이 매우 좁아져야 함을 의미하며, 이는 원래의 목적인 전대역 필터보다 빠른 대칭좌표 분리에서 벗어나게 된다.

또한 수식에 있는 \cot , \csc 함수는 $\delta \approx 0^+$ 이 될수록 값은 ∞ 로 발산함을 알 수 있다. 즉 대역폭을 결정짓는 δ 를 줄일수록 검출 속도는 빨라질 수 있으나 노이즈등에 민감해질 수 있음을 알 수 있다.

2.1.2 과도상태에서의 해석

위의 식 (7) (14)는 총 8개의 식이 되어 현재 대칭좌표 분리 값과 그 이전 값이 계산된다. 이때 만일 $S_{\alpha\beta_1}$ 과 $S_{\alpha\beta_2}$ 가 한 샘플링 차이로 똑같이 움직인다면 $S_{\alpha\beta_2}$ 의 양상을 보고 $S_{\alpha\beta_1}$ 에서 필터링 할 수 있을 것이다.

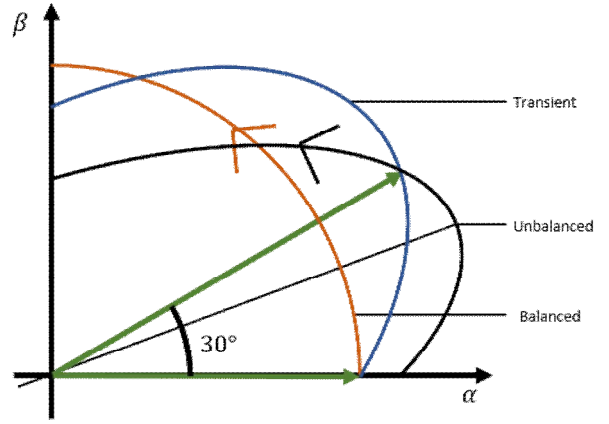


그림 2 복소공간에서 과도상태 해석
Fig. 2 Transient state in complex space

그러나 그림(2)와 같이 처음에 정상분만 있는 상황에서 역상분이 갑작스럽게 추가 될 경우 실제 정상분과 역상분이 만드는 타원과 과도상태에서의 타원이 다르게 생기게 된다. 이때 $S_{\alpha\beta_1}$ 의 경우 정상상태에서 δ 만큼의 위상각이 뒤쳐져 나오게 되지만, 과도 상태에서는 실제의 타원과는 다른 타원을 그리게 되면서 실제 값과의 괴리가 발생하게 된다. 즉 실제로는 $S_{\alpha\beta_2}$ 의 계산식만 사용하게 된다.

2.2 시뮬레이션

고속화 대칭좌표 분리 알고리즘을 검증하기 위하여 기준값과 통상적으로 사용하는 전대역필터를 같이 표시하였다. 시뮬레이션은 MATLAB/Simulink로 검증하였다.

전대역 필터와 비교했을 때 정상상태에 도달하는데 있어 $\delta=90^\circ$ 일 때 거의 비슷하며 그보다 작은 δ 에서는 더 빠르게 도달함을 알 수 있다. 과도상태가 필터와 달리 계단 응답을 보임을 확인할 수 있다. 해당 시뮬레이션은 노이즈가 없는 이상적인 상황이므로 위상각을 극단적으로 줄여도 문제없이 따라가게 됨을 볼 수 있다.

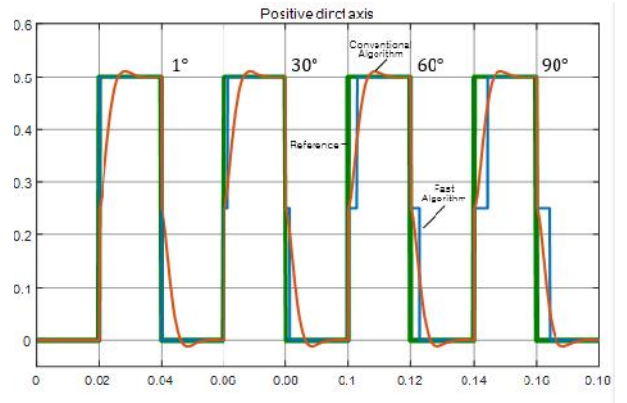


그림 3 δ 에 따른 d축의 응답특성
Fig. 3 Response characteristic of positive d-axis according to δ angle

2.3 실험

실제 검증을 위해 32비트 CPU인 TMS320F28335와 불평형 상태를 모의할 수 있는 NF사의 Programmable AC/DC Power Source를 이용하였다. 역상분을 0.5 pu를 주입하여 δ 를 각각 30° , 60° , 90° 에서 응답을 확인하였으며, 과도상태에서 정상분의 응답을 같이 확인하였다.

전대역 필터의 경우 대역폭이 377rad/s 이므로 시정수는 $\tau_\alpha = 1/377 = 2.65\text{ms}$ 이며, 일반적으로 1계 시스템에서 과도성분의 95%가 사라지는데 시정수의 3배로 예상한다. 두 점을 샘플링하는 방법의 경우 한주기의 시간과 위상각과 δ 의 시간과 위상각에 비례적인 관계가 있음을 확인 하였다. 즉 $\delta = 30^\circ$ 의 경우 $t_{\text{delay}} : 16.67 = 30 : 360$ 이므로 $t_{\text{delay}} = 1.4\text{ms}$ 임을 확인할 수 있다.

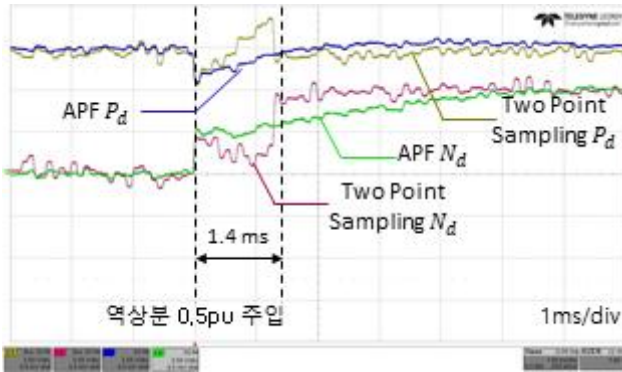


그림 4 $\delta = 30^\circ$ 일 때 전대역 필터와의 비교
Fig. 4 Comparison of $\delta = 30^\circ$ and all pass filter

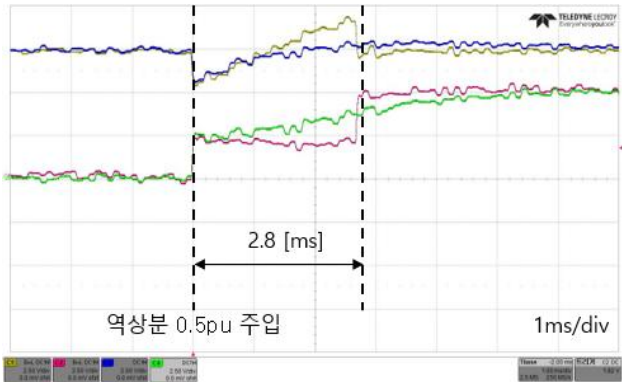


그림 5 $\delta = 60^\circ$ 일 때 전대역 필터와의 비교
Fig. 5 Comparison of $\delta = 60^\circ$ and all pass filter

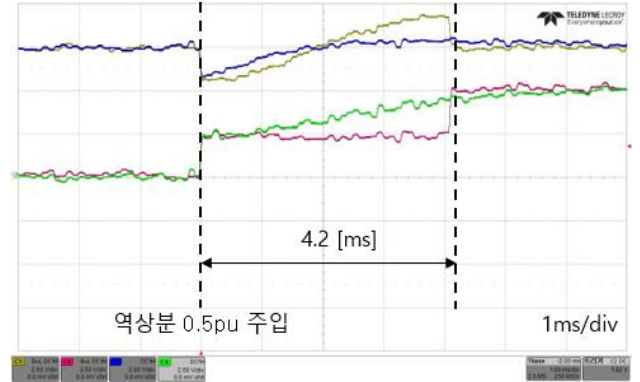


그림 6 $\delta = 90^\circ$ 일 때 전대역 필터와의 비교
Fig. 6 Comparison of $\delta = 90^\circ$ and all pass filter

3. 결론

본 논문에서는 대칭좌표 분리를 위한 고속화 알고리즘을 제안 하였으며, 원하는 대역폭으로 조정이 가능함을 확인하였다. 제안하는 알고리즘은 두 점을 샘플링 하면 타원의 궤적을 유추할 수 있으며, 이를 통해 정상분과 역상분을 분리 해내는 것이다. 수식적으로 해가 유일하게 존재하는 조건을 확인하였으며, 기하학적인 관점에서 동일한 결론이 나올 수 있음을 확인 하였다. 최종적으로 시뮬레이션과 실험을 통하여 전대역 필터를 통한 대칭 좌표 분리와 비교하였으며, 응답속도와 과도상태에 대한 분석을 진행 하였다. 마지막으로 외란에 민감하게 반응하는 문제점이 있으므로 고조파 감쇄의 적절한 방안과 민감도와 응답성을 고려한 최적의 δ 를 선정하는 방법에 대한 후속 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] Byung Ki Kwon, "Current Control in Cascaded H bridge STATCOM for Electric Arc Furnaces" Proceedings of the KIPE, Vol. 20, No. 1, February 2015