

순간 정전 시 V/f 제어의 Ride Through 운전

최승철, 이학준, 홍찬욱, 이상준
LS산전 자동화 연구소

Ride-through control method for instantaneous power interruption in V/f controlled drive system

Seung-Cheol Choi, Hak-Jun Lee, Chanook Hong, Sang-Joon Lee
LSIS Automation R&D Division

ABSTRACT

범용 인버터는 계통 전원의 전압 강하 또는 정전 발생 시, 정류기의 직류단 전압이 감소하여 인버터 고장(fault)이 발생한다. 보호 동작으로서 인버터는 일시적으로 전원 공급이 이루어 지지 않는 상태에서 제어 기능 및 관리가 이루어 질 수 있도록 Ride-Through 운전을 수행한다. 고장 발생 없이 제어 시스템 상태를 유지하여 전원 복구 후, 빠른 재기동이 가능하다. 본 논문에서 V/f 제어를 사용하는 범용 인버터를 고려한 Ride-Through 방법으로 KEB(Kinetic Energy Backup) 운전을 제안한다. KEB 운전은 순시 정전에 의한 인버터 고장 방지를 위해 요구되는 에너지를 계산하고 슬립 주파수를 조절하여 회생 운전을 통해 인버터의 직류단 전압을 일정하게 유지한다. 제안한 방법은 실험을 통해 유효성을 검증한다.

1. 서론

범용 인버터는 입력 교류 전원에 정전이 발생하면 수 백msec 이내에 저 전압 고장으로 PWM 출력을 차단한다. 정전 시간이 짧아 빠른 시간 내에 복전된 경우 또는 부하 관성이 커서 다시 가속하는데 긴 시간이 필요한 경우에 전동기를 정지하였다가 재기동하는 것은 경제적 손실을 야기할 수 있다. 따라서 정전 발생 시, 인버터 출력을 차단하지 않고, 연속적인 제어가 가능한 Ride-Through 기능이 요구된다.^[1]

Ride-Through는 다양한 방식으로 사용되며, KEB는 대표적인 Ride-Through 운전 방법 중 하나이다. 전동기의 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 인버터의 직류단 전압을 적절히 유지하는 방식으로 순시 정전 시, 빠른 정상 운전 복구가 가능하다. 마찰이 거의 없고, 관성이 큰 부하에 적용하기 용이하고, 일반적인 V/f 제어에 적용 가능하다.

본 논문에서는 V/f 제어를 사용하는 범용 인버터를 고려하여 재기동 시간을 줄이고 안정한 성능을 확보할 수 있는 KEB 운전을 제안한다. 인버터 출력 전압과 전류, 유도기 공칭 값을 사용하여 유도기 회전 속도를 추정하고, 인버터 제어 시스템에 필요한 에너지에 따라 슬립 주파수를 계산하여 적절한 인버터 운전 주파수를 조정한다. 인버터 운전 주파수 조정과 V/f 운전 점을 사용하여 회생 운전을 통해 인버터 제어 시스템을 안정하게 유지한다. 제안된 방법은 자사의 인버터를 사용하여 실험을 통해 그 유용성을 검증하였다.

2. 제안하는 KEB 운전

2.1 V/f 제어 기반의 KEB 운전

기존 V/f 제어 시스템에 슬립 주파수 발생기와 속도 추정기를 추가하여 그림 1과 같이 KEB 제어기를 구성하였다. V/f 운전은 사용자로부터 입력된 지령 속도를 추종하기 위해 인버터 출력 주파수를 발생시키지만, KEB는 직류 단 전압을 일정하게 유지하기 위해 인버터 출력 주파수를 발생시킨다.

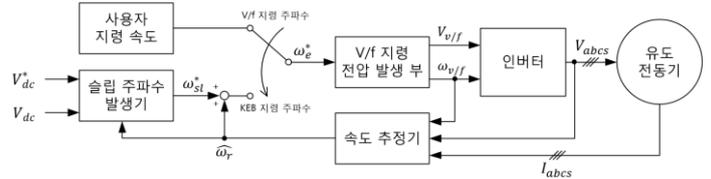


그림 1. KEB 제어기 구성도

KEB 동작 시, 슬립 주파수 발생기에서 직류단 전압 지령(V_{dc}^*)과 실제 직류단 전압(V_{dc})을 비교하여 KEB 운전의 회생 에너지를 발생시키는 슬립 주파수(ω_{sl}^*)를 계산한다. 속도 추정기는 인버터 출력 전압(V_{abcs})과 전류(I_{abcs}) 그리고 유도기 공칭 값을 사용하여, 실제 유도기 회전 속도($\hat{\omega}_r$)를 추정한다. 인버터 출력 주파수(ω_e^*)는 추정한 유도기 회전 주파수와 슬립 주파수의 합이고, 그림 1의 V/f 지령 전압 발생 부에서 기존 V/f 제어의 주파수와 전압 관계에 따라 출력 전압 크기($V_{v/f}$)를 결정한다. 다음으로 V/f 제어 시스템에 추가한 슬립 주파수 발생기와 속도 추정기에 대하여 살펴본다.

2.1.1 슬립 주파수 발생기

본 논문의 KEB 운전은 유도 전동기의 슬립 주파수를 사용하여 직류단 전압을 일정하게 유지하기 위한 회생 에너지를 전동기로부터 공급 받는다. 슬립 주파수 발생기에서는 KEB 운전에 요구되는 회생 에너지를 계산하고, 이에 해당하는 슬립 주파수를 발생시킨다.

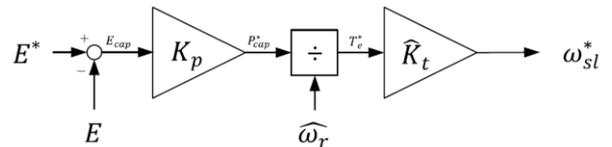


그림 2. 슬립 주파수 발생기 블록도

그림 2의 E^* 와 E 는 각각 직류단 전압 지령과 실제 직류단 전압에 해당하는 전기 에너지이다. 두 에너지의 차(E_{cap})는 직류단 캐패시터(C_{dc})에 필요한 에너지이고, 식(1)과 같다.

$$E_{cap} = E^* - E = \frac{C_{dc}}{2} (V_{dc}^{*2} - V_{dc}^2) \quad (1)$$

$$\hat{K}_t = \omega_{sl-rated} / T_{rated} \quad (2)$$

두 에너지의 차와 비례 제어를 사용하여 전력(P_{cap})을 계산한다. 그리고 속도 추정기에서 계산된 속도를 사용하여 지령 토크(T_e^*)를 계산하고 최종적으로 지령 토크와 토크 상수(\hat{K}_t)의 곱으로 KEB 운전에서 필요한 슬립 주파수를 발생시킨다. 여기서 토크 상수는 유도기 공칭 값의 정격 슬립 주파수와 정격 토크 비(ratio)이며, 식(2)에 해당한다.

$$E = \frac{K_p \frac{\omega_r \hat{K}_t}{\hat{\omega}_r K_t} E^* + \frac{\omega_r}{K_t} (\hat{\omega}_r - \omega_r)}{s + K_p \frac{\omega_r \hat{K}_t}{\hat{\omega}_r K_t}} \quad (3)$$

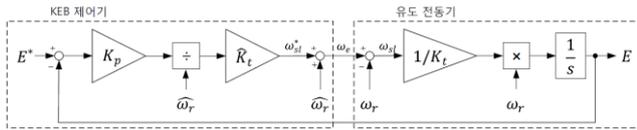


그림 3. KEB 제어 블록도

그림 3은 KEB 제어 블록도이고, 식(3)과 같이 입출력 관계를 나타낼 수 있다. 추정된 속도와 토크 상수에 오차가 없는 경우, KEB 제어기 대역폭은 비례 제어기 이득(K_p)으로 결정된다.

하지만, 회전자 속도와 토크 상수의 오차는 KEB 제어기에 영향을 미칠 수 있다. 특히, 회전자 속도 오차는 직류단 전압의 정상 상태 오차를 발생시킬 수 있으나, 속도 추정 성능을 개선하거나 비례 제어기 이득을 충분히 크게 선정하여, 개선 가능하다.

2.1.2 회전자 속도 추정기

슬립 주파수 발생기의 출력은 슬립 주파수 지령이고, 계산된 슬립 주파수 지령을 전동기 구동에 적용하기 위해 유도기 회전 속도 정보가 필요하다. 하지만, 일반적으로 V/f 운전은 개루프(open loop) 제어로서, 속도 정보 사용이 어렵다. 따라서 가용한 인버터 출력 전압과 전류 그리고 전동기 공칭 값을 통해 유도기 회전 속도를 추정한다.

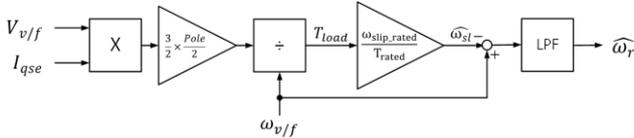


그림 4. 속도 추정기 블록도

속도 추정기는 지령 각 기준의 동기 좌표 계 q축 출력 전압($V_{v/f}$)과 전류(I_{qse})를 곱하여 출력 전력을 계산한다. 출력 전력에 극 수를 고려하고 V/f 운전 주파수($\omega_{v/f}$)로 나누어 부하 토크(T_{load})를 계산한다. 계산된 부하 토크로부터 슬립 주파수와 토크 관계를 통해 슬립 주파수를 추정한다. 유도기 회전 주파수는 인버터 운전 주파수와 추정한 슬립 주파수의 차(subtraction)에 해당하며, 시스템 안정을 고려하여 지역 통과 여과기를 적절히 사용한다. 속도 추정기는 KEB 운전 순서와 관계없이 독립적으로 동작한다.

2.2 KEB 동작 순서

일반적인 KEB 동작은 다음과 같다. 인버터의 전원 공급이 원활하지 않는 경우에 직류단 전압이 감소한다. 하지만, 인버터는 전동기 제어를 유지하기 위하여 지속적으로 전압을

출력하고 제어 시스템에 필요한 에너지를 유도기로부터 전달 받는다. 인버터는 슬립 주파수를 조정하여 회생 운전을 위해 출력 주파수를 유도기 회전 속도보다 감소시킨다. 이 때, 유도기는 발전기와 같은 동작을 하여 인버터 및 전동기 제어를 유지할 수 있도록 전원 역할을 한다. 이러한 회생 운전을 통해 전원 고장이 발생하여도 직류단 전압을 일정하게 유지할 수 있다. 그리고 유도기가 회전 중에 전원이 복구되면, V/f 운전으로 전환하여, 빠른 정상 복구가 가능하다.

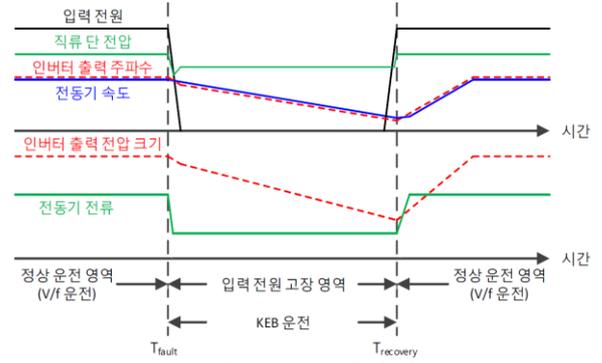


그림 5. KEB 동작 순서

일반적인 KEB 동작을 바탕으로 그림 5와 같이 KEB 동작 순서를 구성하였다. 정상 운전 영역에서 V/f 운전으로 유도기를 구동한다. 직류단 전압의 크기는 입력 전원에 의하여 결정되며, 인버터 출력 주파수는 부하에 따라 유도기 속도와 같거나 크다. 전류는 부하에 의하여 가변한다. 입력 전원 고장 시(T_{fault}), 입력 전원은 감소하고, 직류단 전압도 입력 전원의 영향으로 감소한다. 전원 고장 여부는 직류단 전압의 크기를 기준 값과 비교하여 판단한다. 직류단 전압이 기준 값보다 작으면, 전원 고장으로 판단하여 KEB 운전을 수행한다. 복귀 여부도 직류단 전압 크기를 기준 값과 비교하여 판단하고, 정상 운전 영역에서 V/f 운전을 수행한다.

전원 고장이 발생하면, 유도기는 부하에 의하여 회전 속도가 감소한다. 인버터 출력 주파수는 KEB 동작으로 인하여 유도기보다 낮은 속도로 운전하고, 인버터 출력 전압은 V/f 운전에 해당하는 전압 크기를 갖는다. KEB 운전에서 요구되는 회생 에너지는 작으므로 유도기 전류 크기는 대략 무부하(no load) 전류의 크기를 갖는다. 직류단 전압은 입력 전원에 의하여 감소 후, KEB 제어기 이득에 따라 빠르게 직류단 지령 전압을 추종하여 일정 전압을 유지한다.

입력 전원이 복구되면($T_{recovery}$), 직류단 전압은 입력 전압에 의하여 정상 범위의 전압 크기를 갖는다. KEB 운전은 동작하지 않으며, V/f 운전을 수행한다. KEB 운전은 V/f 운전 점을 동일하게 사용하므로, V/f 운전으로 운전 전환 시, 별도의 전환 기술이 요구되지 않는다. 그리고 슬립 주파수는 부하에 의해 결정되므로 회생 동작을 하지 않고, 과전압 고장 없이 안정한 운전 전환이 가능하다. 운전 전환 후, V/f 운전을 통해 고장 이전의 운전 점으로 회복한다. 유도기가 정지하지 않고, 정상 운전이 가능하므로 대기 시간의 감소를 기대할 수 있다.

3. 실험

3.1 실험 환경

제안한 방법의 유효성을 검증하기 위해 3.7kW M-G 실험

장치를 사용하여 실험을 수행하였다. 임의의 시간에 실험 인버터의 입력 전원을 수동으로 on/off하여 입력 전원 고장 및 복구를 모의하였고, 부하는 서보 전동기를 사용하여 전동기 회전 속도 제곱에 비례하는 부하 토크를 발생시켰다.

3.2 실험 결과

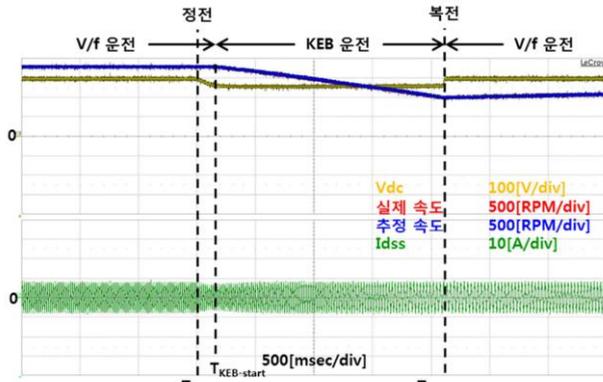
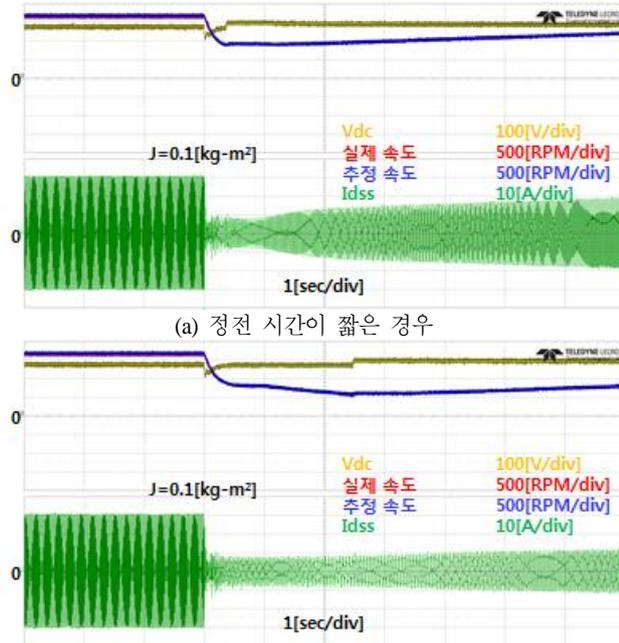


그림 6. KEB 무부하 실험 결과

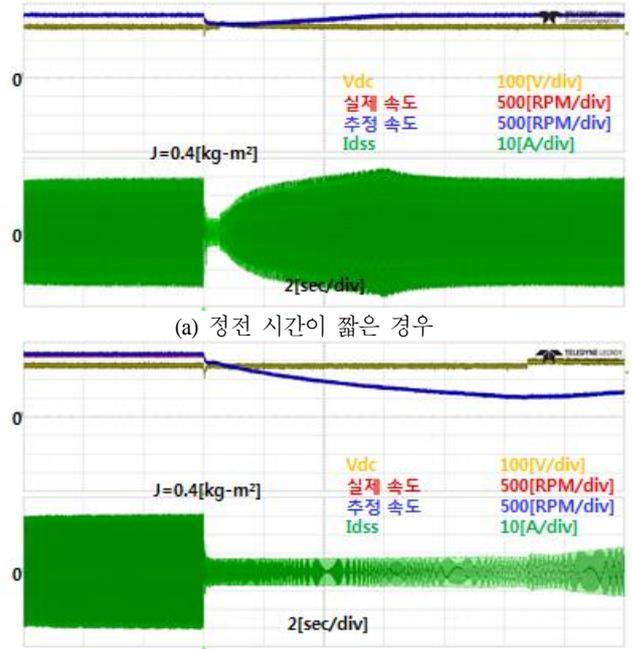
먼저, 그림 6의 무부하 실험 결과를 통해 KEB 동작을 확인한다. 정상 운전 영역에서 V/f 운전을 수행하였고, 임의의 시점에 인버터 입력 단 스위치를 off 하여 정전 상황을 모의하였다. 정상 운전 영역에서 직류단 전압의 크기는 약 300[V]이고, 유도기 속도는 1800[r/min]이다. 정전 발생 후, 무부하이므로 직류단 전압은 서서히 감소하여 KEB 운전이 시작된다. KEB 운전 구간에서 직류단 전압은 더 이상 감소하지 않고, 복전 시점까지 고장 발생 없이 안정적으로 제어 시스템을 유지함을 확인할 수 있다.



(a) 정전 시간이 짧은 경우

(b) 정전 시간이 긴 경우

그림 7. KEB 부하 실험 결과 @ $J=0.1[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$, 부하 \propto 속도²



(a) 정전 시간이 짧은 경우

(b) 정전 시간이 긴 경우

그림 8. KEB 부하 실험 결과 @ $J=0.4[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$, 부하 \propto 속도²

그림 7과 8은 KEB 부하 실험 결과를 보여준다. 부하는 정격 속도에서 정격 토크의 150%를 발생시키며, 속도 제곱에 비례한다. 관성은 각각 0.1[$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]와 0.4[$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]이고, 0.4[$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]의 관성은 상대적으로 0.1[$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]의 관성보다 큰 부하를 발생시킨다. 정격 속도의 정상 운전 구간에서는 150% 부하에 의하여 전류는 정격의 약 150%가 발생한다. 하지만, 정전 후 KEB 운전 구간에서는 큰 전력이 요구되지 않으므로, 전류는 무부하 전류만큼 발생한다. 부하에 따라 직류단 전압의 감소 속도가 다를 수 있는데, 부하가 클수록 직류단 전압의 감소가 빠르므로 KEB의 대역폭을 크게 선정한다. KEB 운전 구간 동안, 직류단 전압은 280[V]의 일정한 전압 값을 유지한다. 안정한 KEB 운전이 가능하고 복전 후, 오버슈트(overshoot)없이 V/f 운전 전환하여 V/f 운전을 통해 고장 발생 이전의 운전 점으로 회복함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 인버터의 Ride-Through 기능으로 KEB 운전을 제안하였다. 제안한 KEB는 유도기 제어 시스템에 필요한 전력과 슬립 주파수를 계산하고, 기존의 V/f 운전 점을 사용한다. 그리고 범용 인버터에 적용이 용이하도록 전동기 공칭 값을 사용하고 조종 요소(tuning factor)를 최소화하였다. 정전 발생 시, 인버터 고장 없이 직류단 전압을 일정하게 유지하고 복전 후, 안정한 재기동이 가능함을 실험을 통해 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 전미립, 김광연, 김정빈, 김경서, “산업용 인버터의 Power Loss Ride-Through”, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집, pp. 309-310, 2010, 7.