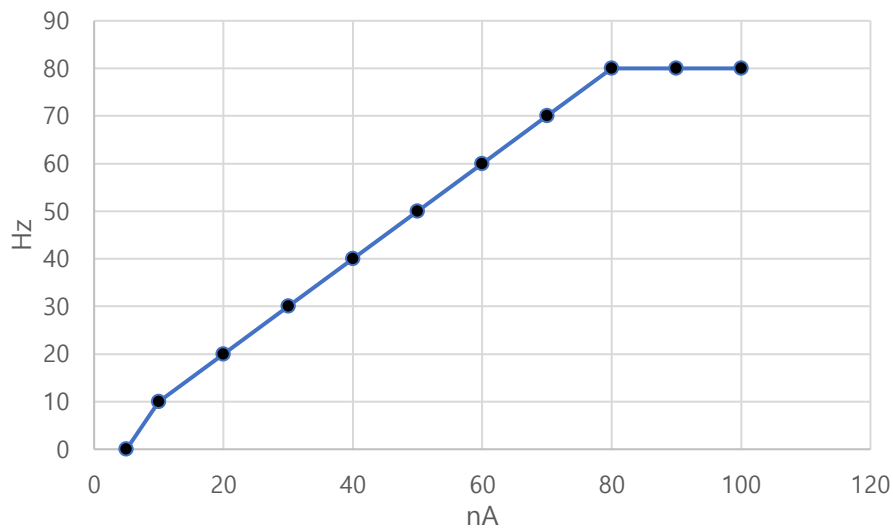


**[Exercise 1.2]** 입력 전류  $I$ 에 대해서, LIF 뉴런은 firing frequency  $f$ 를 가지고 규칙적으로 firing한다. 만약  $I_{min}$  보다  $I$ 가 작다면  $f$ 는 0Hz가 되고,  $I$ 가 커지면  $f$  또한 증가한다. 우리는 이를 f-I curve로써 표현할 수 있다.

1.2.1. refractory period가 3ms인 f-I 커브를 그려볼 것이다.

a. 기대되는 f-I curve 모양을 그려보자.

: 밑의 [그래프1]과 같은 curve가 나올 것이라는 걸 예상할 수 있다. 일정 전류까지는 주파수가 0이다가 임계값을 넘으면 주파수가 입력 전류에 비례하여 증가할 것이다. 또한 최대 rate에 도달하게 되면 증가를 멈추게 될 것이다.



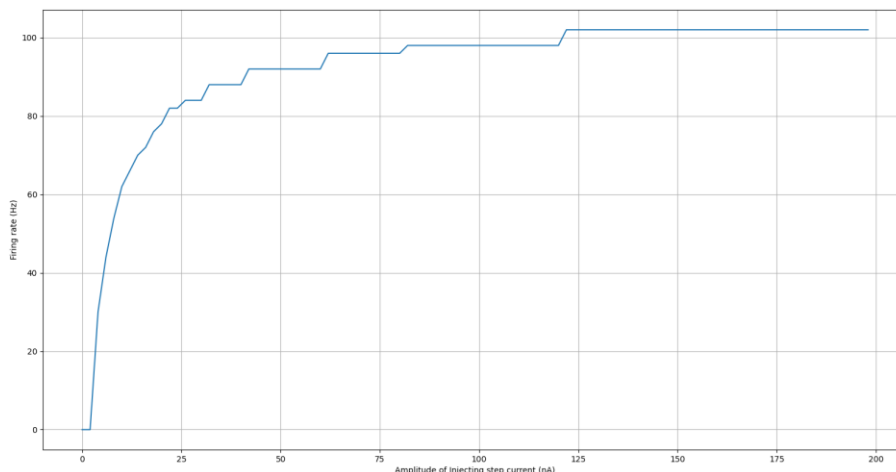
[그래프1] – 기대되는 f-I curve 모양

b. 뉴런이 firing될 수 있는 최대 rate를 구해라.

: c의 f-I curve를 통해 100Hz-105Hz 정도가 firing될 수 있는 최대 rate일 것이라는 걸 확인할 수 있다.

c. 0nA부터 100nA까지의 전류를 LIF 뉴런에 가해보자. 각 전류에 대해 500ms동안 시뮬레이션을 실행하고, firing frequency를 결정하여라. 이를 바탕으로 f-I curve를 그려보자.

: 밑의 [그래프2]와 같은 결과를 얻을 수 있다. b.에서 구해야 하는 firing할 수 있는 최대 rate를 구하기 위해 200nA까지의 전류를 LIF 뉴런에 가해보았다. rate는 firing 횟수 나누기 500ms를 하여 구해보았다.



[그래프2] – f-I curve

[Exercise 1.3] LIF 뉴런의 파라미터들은 다음과 같다. *Resting potential, reset voltage, firing threshold, membrane resistance, membrane time-scale, absolute refractory period*. 우리는 알려진 test 전류를 주입 시키므로써 voltage response에 대한 뉴런의 속성을 결정할 수 있다.

### 1.3.1.

a. 랜덤 파라미터 셋을 얻어보자.

: LIF library 의 `get_random_param_set()` 함수를 이용하여 랜덤 파라미터 셋을 구해보았다.

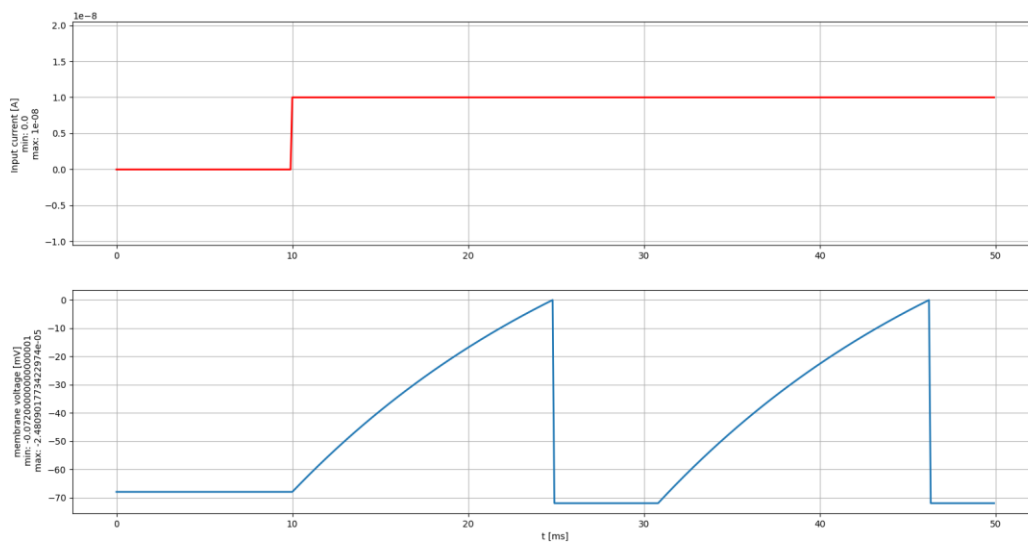
b. 입력 전류를 선택해보자.

: 입력 전류는 10mA으로 설정하였다.

c. 시뮬레이션 시간을 50ms로 설정하고, 시뮬레이션을 진행해보자.

d. 이를 바탕으로 그래프를 그려보자.

: 밑의 [그래프3]과 같은 결과가 나온다.



[그래프3] – 입력 전류를 10mA로 했을 때의 voltage response 그래프

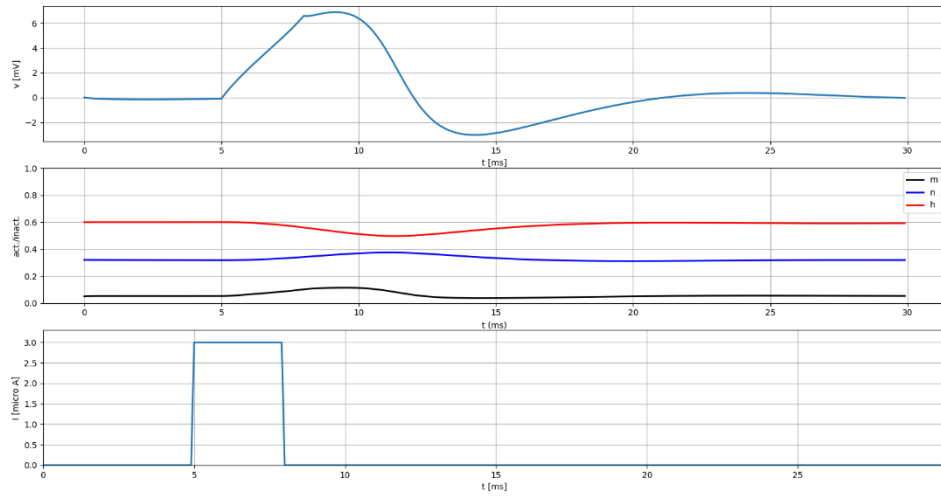
e. 예측값(True Values)과 측정값을 서로 비교해보자.

: 예측값(firing 되는 현상)과 유사한 것을 확인할 수 있다.

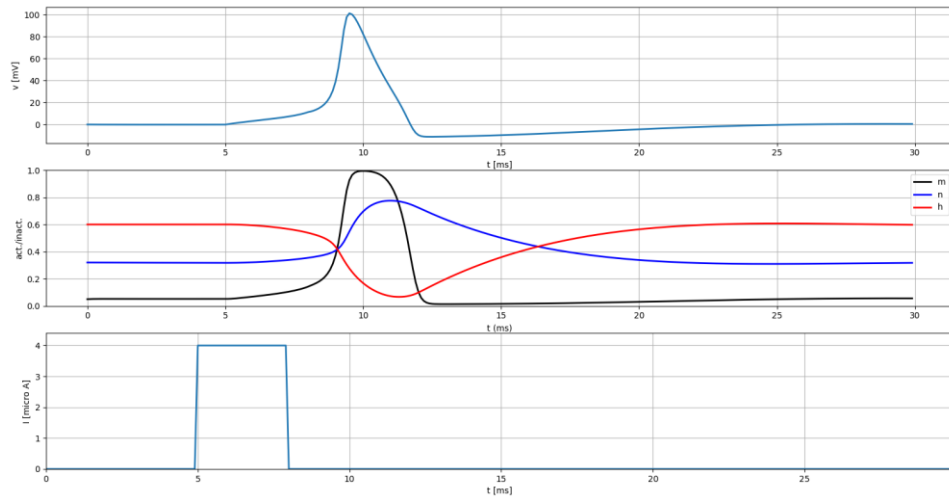
[Exercise 5.1] 다양한 입력 전류에 따른 HH 모델의 반응을 연구한다.

5.1.1. 최소 하나의 spike를 생성하기 위한  $I_{min}$ 을 구해보자.

: spike가 생기는 지점을 찾기 위해 다양한 크기의 전류를 인가해 주었다.  $1\mu A$ 부터 차례대로 인가하다 보면,  $3\sim 4\mu A$  사이에서 spike가 처음으로 생기는 것을 확인할 수 있다. 이는 밑의 그래프를 통해 알아볼 수 있다.



[그래프4] -  $3\mu\text{A}$ 의 전류를 인가했을 때의 모습

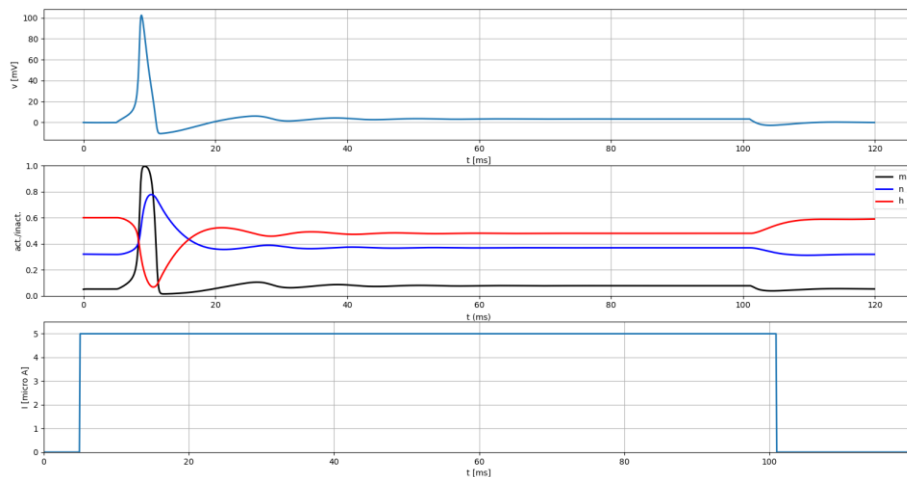


[그래프5] -  $4\mu\text{A}$ 의 전류를 인가했을 때의 모습

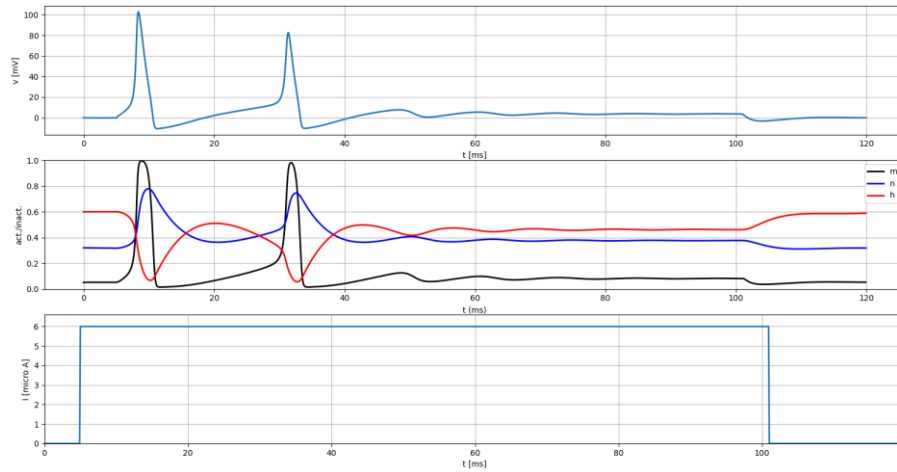
**5.1.2.** repetitive spike를 생성하기 위한 최소 step current amplitude를 구해라. 5.1.1.과의 차이에 대해 알아보자.

: 먼저 repetitive spike를 확인하기 위해서 simulation duration을 길게 잡고 시뮬레이션을 진행했다. 그리고 하나의 spike를 생성하기 위한 최소 전류인  $4\mu\text{A}$ 부터 차례대로 인가해 보았다. 인가하다 보면  $6\sim 7\mu\text{A}$  사이에서 repetitive spike가 생기는 것을 확인할 수 있다. 이는 밑의 그래프를 통해서 알아볼 수 있다.

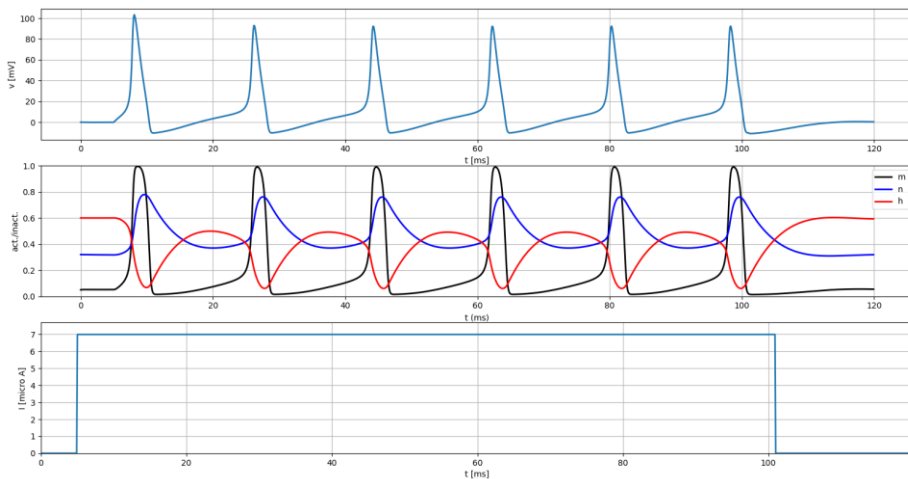
위의 5.1.1.에서는 한 번의 spike를 일으키기 위한 최소 전류에 대해 알아보았다. 우리는 두 시뮬레이션을 통해 repetitive spike는 단일 spike 보다 더 많은 전류 인가를 요한다는 것을 확인할 수 있었다.



[그래프6] -  $5\mu\text{A}$ 의 전류를 인가했을 때의 모습



[그래프7] -  $6\mu A$ 의 전류를 인가했을 때의 모습



[그래프8] -  $7\mu A$ 의 전류를 인가했을 때의 모습

[Exercise 5.4] Brian2 model equations에 대해서 알아보자.

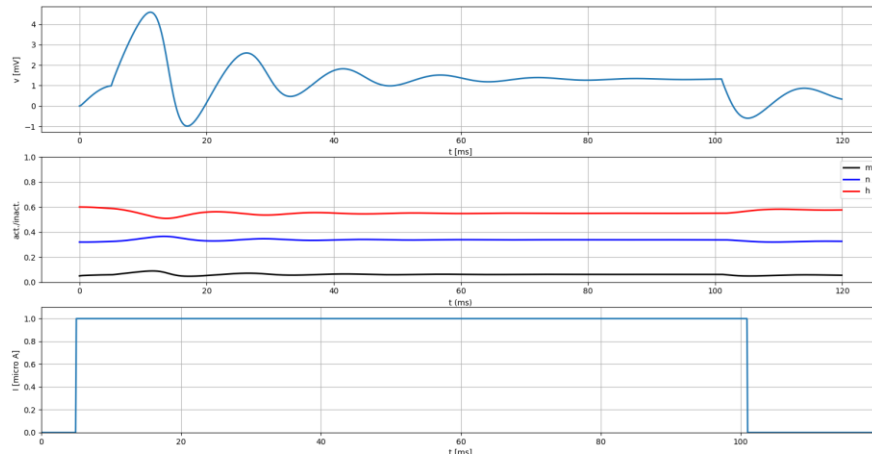
5.3.1. 소스코드에서 나트륨 채널의 밀도를 기존 밀도에 대해 1.4배로 변경해보자.

:  $gNa = 120 * 1.4 * b2.msiemens$  왼쪽 코드를 이용하여 기존 밀도에 1.4를 곱해 주었다.

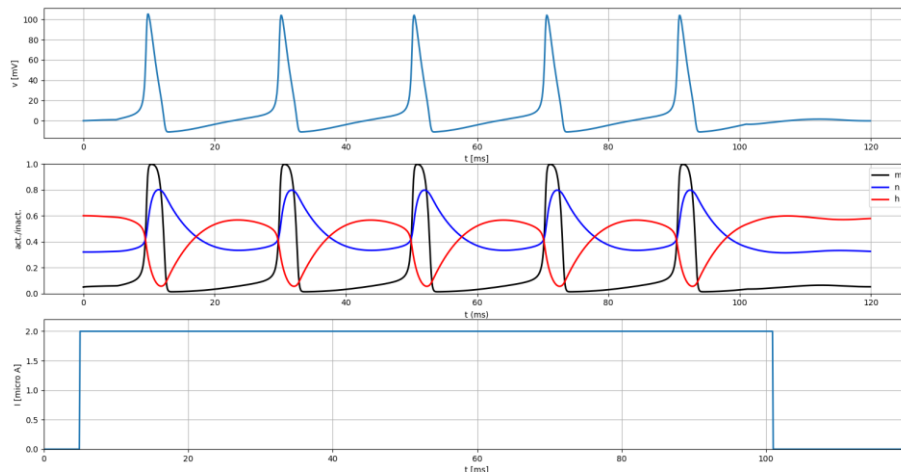
a. repetitive spiking을 일으키는 최소전류는 얼마인가?

: repetitive spike가 생기는 지점을 찾기 위해 다양한 크기의 전류를 인가해 주었다.  $1\mu A$ 부터 차례대로 인가하다 보면,  $1\sim 2\mu A$  사이에서 repetitive spike가 처음으로 생기는 것을 확인할 수 있다. 이는 밑의 그래프를 통해 알아볼 수 있다.

우리는 5.1.2에서 기본 HH model에서 repetitive spike가 생기는 최소 입력 전류를 알아보았다. 이와 이번 시뮬레이션에서의 결과를 비교해보면 이번 시뮬레이션에서의 repetitive spike를 위한 최소 전류가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 sodium의 conductance가 높아질수록 뉴런의 활성화 임계값이 낮아지기 때문이란 걸 예측할 수 있다.



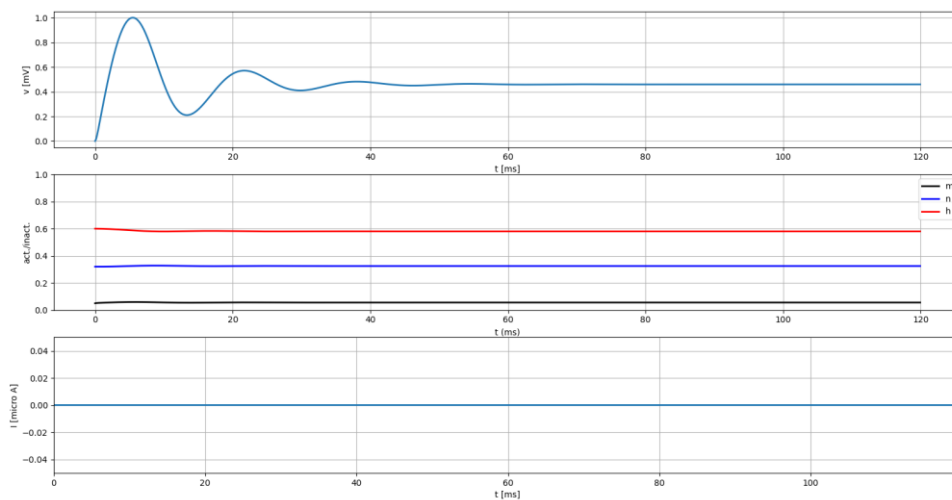
[그래프9] – 나트륨 채널의 밀도가 기존에 대해 1.4배인 뉴런에  $1\mu\text{A}$ 의 전류를 인가했을 때의 모습



[그래프10] – 나트륨 채널의 밀도가 기존 밀도에 대해 1.4배인 뉴런에  $2\mu\text{A}$ 의 전류를 인가했을 때의 모습

b. 뉴런에 전류를 주지 않은 채로 resting potential을 결정해보자. 이 관찰을 Goldman–Hodgkin–Katz voltage equation과 연관지어 생각해보자.

: 입력 전류를  $0\mu\text{A}$ 로 하고 resting potential을 결정해 보았다.  $0.5\sim 1\text{mV}$  정도임을 확인할 수 있다.



c. sodium의 conductance를 높이면 입력 전류 없이도 repetitive spiking을 관찰할 수 있다. 이 이유가 무엇일까?

: sodium의 conductance가 높아지면 뉴런의 활성화 임계값이 낮아지기 때문이다.